ASSOCIAZIONE ITALIANA "GRUPPO MISURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE"

I QUADERNI DEL GMEE
N° 2

Introduzione alla sensoristica industriale
(Parte I)

GMEE

Unità del GMEE di Bari

I QUADERNI DEL GMEE
N° 2

Mario Savino

INTRODUZIONE ALLA SENSORISTICA INDUSTRIALE

Parte Prima

Unità del GMME di Bari

I QUADERNI DEL GMEE N° 2

Introduzione alla sensoristica industriale
Parte prima

Collana “I Quaderni del GMEE” - n° 2
a cura dell’Associazione “Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche”

Con il gentile supporto di

Tutti i diritti di riproduzione, traduzione, adattamento anche parziale sono riservati a norma di legge e a norma delle convenzioni internazionali.
Videoimpaginazione: la fotocomposizione, Torino
Stampa: La Grafica Nuova, Torino

Finito di stampare nel mese di Giugno 2008
ISBN 978-88-903149-1-9

A&T Affidabilità & Tecnologia
Via Palmieri, 63 - 10138 TORINO
Tel. 011/536.34.40 - Fax 011/536.32.44
E-mail: info@affidabilita.com
WEB: www.affidabilita.com

Prefazione

La cultura metrologica ha solide tradizioni in Italia, ma per lo sviluppo del nostro paese è necessario che si diffonda ulteriormente sia nei contenuti sia nel raggiungimento concreto dell'utenza industriale. La scienza delle misure spazia dai tradizionali argomenti inerenti alle misure elettriche, meccaniche e termiche, a quelli più recenti, dedicati alla diagnostica, alle infrastrutture, alle costruzioni, alla biomedica, alla robotica, all'ambiente e alle funzioni umane. Di particolare interesse sono le misure in campo fotonico e quelle basate sulle immagini, in quanto nel prossimo futuro i metodi più diffusi saranno quelli meno invasivi possibili, accompagnati da una chiara visione dell'oggetto in esame.

Come si evince dalla lettura del bel libro del collega Egidi, "Introduzione alla Metrologia", scritto in modo che sia accessibile anche agli studenti delle scuole medie ed elementari, quella di misurare è un'esigenza dell'uomo e le sue radici sono antiche, solo lontanamente immaginabili. La nostra vita non può più fare a meno delle misure, si pensi soltanto a quante volte misuriamo giornalmente il tempo con i nostri orologi e quante misure di massa e di portata sono eseguite con le bilance e i misuratori di flusso dei nostri fornitori. Le misure non sono solo quelle eseguite dai letturisti dei contatori dell'acqua e del gas, visto che la lettura del contatore dell'energia elettrica è ormai eseguita automaticamente a distanza. Gli strumenti di misura oggi sono in grado di registrare l'evolversi dei fenomeni naturali e industriali, di permettere la diagnosi contestuale o di conservare le informazioni utili per l'elaborazione successiva. Le misure permettono anche il controllo di macchine, di robot, di sistemi complessi. Oggi i sistemi informativi più evoluti sono quelli basati sulle misure. Le *Information and Communication Technologies* (ICT) permettono oggi di creare sistemi informativi molto efficienti per diverse applicazioni. Sono stati realizzati diversi sistemi artificiali che utilizzano algoritmi genetici, capaci di apprendimento, e che rappresentano un modello dell'attività cognitiva umana. Tali sistemi artificiali si sono rivelati utilissimi nell'ausilio del lavoro di fisici, di ingegneri, di medici, e di tanti altri professionisti. La prospettiva è quella, che potrebbe apparire avveniristica, ma non lo è, di sostituire l'uomo, con prestazioni possibilmente superiori, in molte delle sue attività.

L'importanza di imparare a misurare deriva dalla semplice constatazione che solo misure corrette sono in grado di convalidare la bontà del sistema informativo e di permetterne l'espansione attraverso l'apprendimento. Viceversa se le misure sono errate si potrà ritenere non valido anche un sistema informativo ben progettato. È quindi imperativo che chi opera nell'industria, nei servizi impari ad utilizzare e a realizzare correttamente gli strumenti di misura e che nelle scuole e nelle università si affermi sempre più la cultura metrologica.

La qualità dei prodotti e dei processi è notevolmente migliorata grazie anche all'evoluzione dei sistemi di misura, gestiti in genere da un calcolatore ed in grado sia di elaborare una serie notevole di informazioni provenienti da diversi sensori, sempre più miniaturizzati e distribuiti, sia di eseguire l'autocontrollo delle prestazioni.

Questo quaderno è rivolto a quanti, anche se non in possesso di una cultura specifica, sono affascinati dallo sviluppo scientifico e si vogliono avvicinare alla scoperta del mondo della sensoristica, un campo in forte evoluzione e che attraverso le micro e le nano tecnologie si svilupperà sempre più nel prossimo futuro. Spero inoltre possa essere utile a quanti nelle industrie, nei servizi si trovano ad operare con questi minuscoli dispositivi e non sanno come impiegarli nel modo migliore. Allo scopo di rendere agevole la lettura, tutte le trattazioni matematiche sono riportate in appendice.

Il quaderno è una rielaborazione aggiornata di alcuni capitoli contenuti in un mio libro precedente "Fondamenti di scienza delle misure", non più disponibile in commercio, ed è suddiviso in due parti, la seconda delle quali sarà pubblicata in seguito e conterrà la descrizione dei sensori più diffusi in campo industriale.

Ringrazio la mia famiglia per la serenità trasmessami e quanti mi hanno spinto a cimentarmi di nuovo con la scrittura di un libro, il GMEE (Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche), il vecchio editore del libro citato che mi ha autorizzato ad utilizzare parte del materiale in esso contenuto ed il nuovo editore, che ha creduto in questa nuova iniziativa.

Un grazie particolare va al Comitato di redazione dei quaderni GMEE e a Francesco Adamo, giovane collega del mio Dipartimento, per gli utili suggerimenti tesi a migliorare il contenuto del libro.

Infine vorrei ricordare due carissimi colleghi ed amici, prematuramente scomparsi, con i quali ho lavorato intensamente nell'ambito del GMEE: Italo Gorini e Carlo Offelli. Essi sono stati autori di diversi libri ed articoli sui sensori, che hanno rappresentato un sicuro riferimento nella stesura di questo quaderno.

Mario Savino
m.savino@poliba.it

Indice

Pag.

Prefazione 3

1. Fondamenti sui sensori 7
1.1 Definizioni 9
1.2 Il sensore intelligente e i MEMS 11

2. Classificazione e rappresentazione dei sensori 19
2.1 Sensori passivi ed attivi 20
2.2 Rappresentazione dei sensori 22

3. Caratterizzazione dei sensori 24
3.1 Parametri fondamentali dei sensori 25
3.2 Caratteristiche di un sensore 29
3.3 Taratura o calibrazione 31
3.4 Linearizzazione della curva di taratura 36
3.5 Funzionamento in regime dinamico 38
3.6 Funzione di trasferimento errore dinamico 39
3.7 Sistemi di ordine zero 40
3.8 Sistemi del primo ordine 40
3.9 Sistemi del secondo ordine 45
3.10 Le caratteristiche di qualità 51
3.11 Affidabilità dei sensori 56
3.12 Caratteristiche metrologiche ambientali 63

4. Principi fisici dei principali sensori 64
4.1 Effetti fotonici 66
4.2 Effetto Doppler 70
4.3 Effetti piezoelettrico, piroelettrico, piezoresistivo 72
4.4 Effetti magnetici 75
4.5 Effetti termici 80
4.6 Effetti capacitivi 83

Pag.

5. Appendici 85
5.1 Le trasformate di Laplace e di Fourier 85
5.2 Risposta di un sistema del primo ordine a una funzione gradino 86
5.3 Risposta di un sistema del primo ordine a una funzione impulsiva 86
5.4 Risposta di un sistema del primo ordine a una funzione a rampa 87
5.5 Risposta in frequenza di un sistema del primo ordine 88
5.6 Risposta di un sistema del secondo ordine a una funzione gradino 89
5.7 Risposta di un sistema del secondo ordine a una funzione impulsiva 90
5.8 Risposta di un sistema del secondo ordine a una funzione a rampa 90
5.9 Risposta in frequenza di un sistema del secondo ordine 91

Bibliografia 92

Indice analitico 93

1 - Fondamenti sui sensori

Introduzione

Diverse sono state le sfide che l'uomo ha affrontato cimentandosi con le nuove tecnologie. Una tra queste è senza dubbio il tentativo di costruire macchine intelligenti e viventi. Tanti studiosi, ricercatori e tecnici provenienti dalle più disparate discipline si sono interessati e hanno lavorato a questa costruzione. Le motivazioni che spingono il lavoro di ricerca e sviluppo in questo campo sono molteplici e vanno da quella di imitare i sistemi naturali per realizzare prodotti da usare nella vita quotidiana a quella più profonda, presente da sempre nella storia dell'uomo, di diventare creatori di forme viventi, dando vita alla materia inerte. Esiste cioè nell'uomo una pulsione a realizzare oggetti che potranno vivere di vita autonoma ad immagine e somiglianza degli esseri viventi. Il sogno potrebbe essere un robot che non sia semplicemente la mimesi delle attività degli esseri viventi, ma che incarni forme equilibrate ed armoniose come quelle dell'uomo vitruviano, disegnato da *Leonardo da Vinci*, seguendo i canoni classici, e conservato nel Gabinetto dei Disegni e delle Stampe delle Gallerie dell'Accademia di Venezia. Un uomo che si iscrive in piedi con le gambe e le braccia allargate, nelle figure geometriche considerate perfette: il cerchio e il quadrato.

Per comprendere quanto antica sia la pulsione dell'uomo a creare forme viventi, si pensi che i primi esempi di automatismi risalgono all'antico Egitto. Si deve al matematico ed ingegnere greco *Erone di Alessandria*, la prima macchina automatica, risalente ai primi anni dopo Cristo, che serviva ad aprire e chiudere automaticamente le porte di un tempio. È importante sottolineare che *Erone* fu anche autore di tre libri di misure, a sancire lo stretto legame tra la robotica e la metrologia, che è la scienza delle misure e delle sue applicazioni. Il robot entra nella mitologia con il famoso libro del 1976 "L'uomo bicentenario" di *Isaac Asimov*. Significativo e da tenere sempre presente per un autore di libri scientifici è il pensiero di *Asimov* in merito alla divulgazione della scienza: «Ardo dal desiderio di spiegare, e la mia massima soddisfazione è prendere qualcosa di ragionevolmente intricato e renderlo chiaro passo dopo passo. È il modo più facile per chiarire le cose a me stesso».

Per poter realizzare un robot che assomigli all'uomo è necessario dotarlo degli stessi sensi umani. Ecco la prima sfida per i nostri sensori: simulare il funzionamento di occhi, orecchie, mani, bocca, naso. In realtà poi ciò che è percepito deve essere inviato al cervello, per cui gli stimoli esterni sono trasformati in segnali elettrici, proporzionali all'intensità dello stimolo. Il segnale elettrico è quindi trasportato mediante fasci di cavi, detti fibrille, fino al sistema nervoso e quando arriva alla corteccia cerebrale l'uomo prende coscienza del fenomeno percepito dai sensi. Le strade seguite dai segnali provenienti dai nostri sensori sono diverse e raggiungono specifiche zone del nostro cervello in modo che questo possa distinguere le informazioni ricevute. Il microprocessore negli strumenti di misura si comporta come il nostro sistema nervoso centrale, che attraverso

le sinapsi della nostra rete neurale riceve le informazioni provenienti dai cinque sensi, per effetto della differenza del potenziale elettrochimico ionico delle rispettive membrane.

I sensori ormai si vanno sempre più diffondendo e non si limitano a quelli necessari per il controllo di robot, di macchine, di vari dispositivi, ma si espandono in tanti altri campi, come quelli della biomedicina e del monitoraggio ambientale. Essi molto spesso sono inseriti in uno strumento di misura e, anche se genericamente il valore della grandezza fornita dal sensore è definito **indicazione**, i sensori possono espletare, oltre a quella indicativa, altre funzioni quali: **registrazione**; **controllo**; **diagnostica** (sia industriale, sia medica). La **funzione indicativa** può avvenire attraverso un indice mobile su scala graduata o delle cifre su un *display* numerico o un'immagine sullo schermo di un oscilloscopio. Si ricorre ad una **registrazione** quando è necessario avere una cronistoria dell'evoluzione di un fenomeno. Essa si espleta sia attraverso una registrazione su carta o su un supporto magnetico o su un disco ottico o su un *compact disk*, sia attraverso la stampa su carta di una schermata sul *monitor* di un calcolatore. Un sistema di **controllo** richiede la presenza di uno o più sensori. Questi sono sensibili in ingresso alla grandezza da controllare e forniscono in uscita in genere un segnale elettrico che aziona un **attuatore**, che consente di trasformare l'energia in ingresso in altra forma utile al processo di controllo e di misura in atto nel sistema, si pensi ad esempio al termometro che è parte del sistema di controllo del riscaldamento di un ambiente. Per comprendere la funzione di un attuatore si può ancora una volta far riferimento al corpo umano che possiede diversi attuatori, di natura sia meccanica come per esempio i muscoli, sia acustica come per esempio la voce. La **diagnostica industriale** si pone l'obiettivo di acquisire tutte le informazioni possibili sullo stato sia delle macchine sia dei processi automatici e consente di individuare sul nascere potenziali guasti marginali incipienti o già in atto, di seguirne l'evoluzione nel tempo e di programmare con largo anticipo e flessibilità le necessarie azioni correttive. Tecniche di diagnostica industriale si vanno sempre più diffondendo in svariati settori in quanto, operando in tempo reale, consentono una riduzione dei costi di manutenzione preventiva, ma soprattutto migliorano la disponibilità delle macchine e dei processi produttivi e quindi la continuità del servizio. La diagnostica industriale richiede molti sensori predisposti nelle diverse parti del sistema in osservazione, sensori intelligenti, ovvero dotati di intelligenza distribuita e di sistemi di trasmissione ed elaborazione dei dati. La **diagnostica medica** prevede non solo la definizione della malattia, ma anche la misura della sua gravità, la determinazione dei fattori sia prognostici sia predittivi di risposta della cura. Quanto meno la struttura ospedaliera è dotata di sistemi sensori in grado di fornire in tempi brevi tutte le informazioni necessarie ad una rapida diagnosi, tanto più elevata sarà l'incertezza con la quale il medico assumerà le decisioni sul da farsi.

Per poter utilizzare al meglio i sensori e far sì che essi espletino correttamente le loro funzioni è necessario saper misurare, saper valutare l'incertezza della misura da essi fornita, saper tener conto delle grandezze che ne influenzano il comportamento, saper correggerne gli errori derivanti e quindi saper interpretare ed utilizzare le misure che essi forniscono. Le caratteristiche essenziali dei sensori sono la loro accuratezza e precisione, la stabilità nel tempo, la minima interferenza con la quantità da misurare, la linearizzabilità della caratteristica statica, la risoluzione, l'affidabilità e la sensibilità, caratteristiche che saranno esaminate in dettaglio nel testo. Il futuro della sensoristica prevede dispositivi sempre meno invasivi più accurati e sensibili, intelligenti, in grado di fare la diagnosi, di comandare attuatori che sostituiscano l'uomo nell'esecuzione di interventi su macchine, su processi, ma anche sul corpo umano, attraverso la biosensoristica. Oggi

si sta lavorando a rendere i sensori sempre più piccoli, con l'impiego delle nanotecnologie e così sensibili ad un predefinito misurando da percepirne la presenza anche se esso è costituito da una quantità molto piccola.

1.1 - Definizioni

Oltre che di **sensori** si parla di **trasduttori** termini molto spesso utilizzati in modo indifferenziato. Per cercare di distinguere le due parole, nel seguito si fornisce per essi la definizione, riportata dall'ultima edizione, la terza, del VIM (*International Vocabulary of Metrology*).

Per **sensore** si intende un elemento di un sistema di misura che è direttamente soggetto all'azione di un fenomeno, di corpi o di sostanze che trasmettono la grandezza da misurare. Nella nota a questa definizione si precisa che in alcuni campi lo stesso concetto è espresso con il termine **rivelatore**, che è un dispositivo o una sostanza in grado di indicare la presenza sempre di un fenomeno, di corpi o di sostanze, quando si ecceda un **valore di soglia** della grandezza d'interesse.

Nel VIM si definisce **trasduttore** di misura un dispositivo impiegato nelle misurazioni, che fornisce una grandezza in uscita avente una specificata relazione con la grandezza d'ingresso. La parola trasduttore deriva dal verbo latino *traducere* che significa convertire, pertanto per trasduttore si può intendere un dispositivo che riceva energia da un sistema e la ritrasmetta, in genere in forma differente, ad un altro sistema. Per sensore si può intendere un dispositivo sensibile alla grandezza da misurare e che rappresenta il primo elemento di una catena di misura o di un sistema di controllo, dove per **catena di misura** si intende una serie di elementi di un sistema di misura costituenti un singolo percorso del segnale dal sensore ad un elemento di uscita. Quindi il sensore svolge le stesse funzioni dei nostri sensi, rivelando l'esistenza di una grandezza al suo ingresso. Il sensore sarà tanto più pregiato quanto meno il contenuto dell'informazione, che esso trasmette in genere al trasduttore, è alterato. Poiché le capacità dei trasduttori si vanno sempre più estendendo, si può affermare, in base alle definizioni date, che un trasduttore molto spesso ingloba al suo interno diversi sensori, oltre che reti di compensazione e di controllo. In particolare è molto diffuso in diversi trasduttori il controllo della temperatura utilizzando un apposito sensore. Inoltre si va sempre più diffondendo l'utilizzazione della tecnologia a semiconduttore nella realizzazione dei trasduttori, il che sta comportando non solo una sempre più diffusa miniaturizzazione, ma anche una sensibile riduzione dei costi.

In base alla definizione data di trasduttore, si può asserire che in un sistema di misura o di controllo trasduttori si trovano sia negli stadi iniziali sia in quelli finali. Negli elementi di ingresso di un trasduttore si troveranno dei sensori in quelli di uscita il trasduttore conterrà un elemento, che prende il nome di **attuatore**. Come si è detto nell'introduzione il processo è molto simile a quello che avviene nel corpo umano. Ad ogni contatto con oggetti i nostri sensori rivelano la loro presenza e tramite le sinapsi inviano messaggi bioelettrici ai nuclei dei neuroni, nel sistema nervoso centrale, che elabora l'informazione e assume delle decisioni, trasmesse agli attuatori corporali, come muscoli, arti, bocca. Poiché le definizioni date di sensore e trasduttore sono abbastanza ampie, in realtà come è accaduto, sta accadendo e probabilmente accadrà i sensori e i trasduttori continueranno ad essere denominati molto spesso in modo differente. In molti processi industriali essi sono chiamati **trasmettitori** (di pressione, di temperatura, ecc.). In molti campi, come d'altra parte indicato anche nel VIM, in particolare nell'area dei di-

spositivi elettro-ottici, essi sono chiamati **rivelatori** (ad intensità di luce infrarossa, ecc.). Un altro termine molto utilizzato è quello di **cella** (cella di carico invece di sensore di forza, ecc.). Altre parole inglesi molto usate sono ***gage*** (scritto anche ***gauge***, che significa misuratore) e ***pickup*** (nel senso che qui si vuol dare alla parola non può che essere tradotta come sensore). Molto spesso alcuni trasduttori sono denominati aggiungendo la desinenza **-metro** al misurando. A volte i sensori prendono il nome di **sistema sensorio**, ciò proprio per la necessità di adattare il sensore al processo industriale che si vuole governare.

Se si accetta la distinzione fatta precedentemente tra sensore e trasduttore e si conviene di utilizzare correttamente questo termine, ad esso è necessario far riferimento quando si tratti di applicazioni industriali. Non è neanche da sottacere che è rilevante il valore aggiunto nel passaggio da sensore a trasduttore o, come anche sarà meglio spiegato nel seguito, da sensore a sensore intelligente. È chiaro allora che uno stesso sensore potrà essere utilizzato in differenti trasduttori e, reciprocamente, lo stesso trasduttore può utilizzare diversi sensori. In genere, mentre il sensore è definito esclusivamente dalla grandezza da misurare, il trasduttore dipende dal processo e dall'ambiente in cui opera.

Le grandezze fisiche da misurare nella maggior parte dei casi risultano non elettriche. D'altra parte i metodi di misura che assicurano la migliore accuratezza dei risultati e che consentono l'ottimizzazione nella progettazione della strumentazione di misura e controllo sono quelli elettrici. Allo scopo di utilizzare i metodi e le tecniche delle misure elettriche, la grandezza non elettrica deve essere convertita in un segnale elettrico. I sensori quindi molto spesso convertono la grandezza da misurare in un segnale elettrico. La preferenza per un tale tipo di conversione deriva dalla facilità di condizionare, trasmettere, elaborare, memorizzare, visualizzare il segnale o il dato con le tecniche che l'elettronica e l'informatica mettono a disposizione al giorno d'oggi. Inoltre, è solo il caso di ricordarlo, il segnale elettrico ha la prerogativa che con opportuna elaborazione permette l'automazione del processo da controllare e l'autoregolazione del sensore, come sarà chiarito dettagliatamente in seguito. Per esempio mediante un opportuno trasduttore e un controllo in retroazione una termocoppia consente non solo la misura della temperatura, ma anche la variazione della potenza immessa nell'elemento riscaldante, in modo che si abbia la costanza della temperatura entro limiti prefissati. Campi tipici di applicazione dei trasduttori sono i sistemi di controllo di processo, la robotica, le catene di produzione assistite dal calcolatore. L'utilizzazione sempre più diffusa dei sensori si è accompagnata al passaggio sempre più attuale dal controllo manuale dei processi a quello automatico. L'ottimizzazione del processo, come si è detto, si ha mediante l'invio, da parte del sensore, del segnale di controllo ad un opportuno attuatore.

L'**indicazione** del sensore, ovvero l'informazione sul valore della grandezza in uscita al sensore, può essere un segnale *analogico, digitale* o *modulato in frequenza*. I trasduttori nell'industria e nella medicina misurano pressioni, forze, velocità, accelerazioni, flussi, suoni, temperature, parametri chimici, impedenze elettriche e tante altre grandezze. Si vanno sempre più diffondendo i biosensori, dispositivi sensibili alle caratteristiche di molecole, celle o anche di campioni di tessuti, in genere collegati, all'interno di un trasduttore, a un elettrodo o ad un dispositivo ottico o ad un cristallo al quarzo o ad altro ancora. I **biosensori** spesso impiegano molecole biologiche come enzimi o anticorpi. Il *National Research Council* (NRC), che fa parte della *National Academy of Sciences* in USA ha definito il biosensore come un dispositivo **rivelatore** che incorpora sia un organismo vivente o un prodotto derivante da sistemi viventi (come ad esempio un enzima o un anticorpo), sia un **trasduttore** in grado di fornire un'indicazione, un segnale o un'altra forma di riconoscimento della presenza di una specifica sostanza nel-

l'ambiente. Questa definizione dimostra la tendenza ad assegnare al sensore il ruolo predominante nel processo di conversione e trasmissione del segnale.

Il **mercato dei sensori**, grazie alle nuove tecnologie, si va allargando con l'automazione di fabbrica e la diagnostica sia industriale, sia medica, interessando non solo aree nelle quali l'automazione è stata attuata ormai da tempo, ma anche nuovi settori emergenti quale ad esempio quello delle industrie manufatturiere. Come già evidenziato un settore in forte crescita è quello dei biosensori per il quale si stima una crescita annuale del suo mercato superiore al cinquanta percento. Definire il valore del mercato in un settore in rapida espansione tecnologica quale quello dei sensori e degli attuatori risulta estremamente difficile oltre che azzardato. Si tratta di un settore di una notevole vastità ed inoltre si va dal costo del sensore e dell'attuatore che può essere irrisorio a quello del trasduttore completo che risulta decisamente superiore e che permette i maggiori guadagni da parte delle imprese costruttrici. Questo è senza dubbio uno dei motivi per cui nelle banche dati disponibili non vengono distinti i termini sensori e trasduttori. Le tecnologie utilizzate per la realizzazione di sensori, attuatori e trasduttori sono le più disparate per cui si assiste a una forte specializzazione da parte dei costruttori. Chi produce sensori per termocoppie difficilmente commercializza altri tipi di sensori, a meno che questi non si basino sulla stessa tecnologia utilizzata per la termocoppia. Per affrontare lo studio, la progettazione, la realizzazione di sensori occorre avere a disposizione competenze multidisciplinari, utilizzare ricerca di base molto specializzata e conoscere come sfruttare un particolare fenomeno per ricavare un elemento sensibile a un determinato misurando.

I sensori diventano sempre più piccoli, meno costosi, più affidabili, più intelligenti, meno attaccabili da ambienti ostili e utilizzano sempre più semiconduttori e materiali ottici. Altre tendenze sono quelle di portare il sensore più vicino al processo e l'intelligenza più vicina al sensore. Tecnologie avanzate per la realizzazione di sensori impiegano la interferometria laser, le fibre ottiche, i radar modulati, l'interferenza ottica, i sensori di forza e movimento a sei assi per misurare componenti multiple, sensori che sono tanto leggeri e di dimensioni tali da poter essere montati sulle dita di una pinza per impianti robotizzati.

1.2 - Il sensore intelligente e i MEMS

Le nuove tecnologie dei moderni microsistemi rendono possibile la realizzazione di sensori in cui l'elemento sensibile è integrato sullo stesso *chip*, in scala microscopica, con l'elettronica di controllo, di misura e di elaborazione dei segnali. Nel campo della microelettronica e dei sistemi a larga scala d'integrazione (VLSI) il materiale tecnologicamente più conosciuto è il silicio, che ha alcune proprietà tali da renderlo adatto alla realizzazione di sensori per diverse grandezze. Si parla correntemente di **sensori integrati** con riferimento a quei dispositivi in cui sono predisposti sullo stesso substrato, molto spesso di silicio, i sistemi sensori e l'elettronica di condizionamento del segnale. Nell'ambito dei sensori integrati è sorta l'esigenza di caratterizzarne un sottoinsieme che presenti oltre al sistema di condizionamento anche un sistema di elaborazione mediante un microprocessore. A questi dispositivi, che richiedono molto spesso un'unità fisica e anche una progettazione dedicata, si è dato il nome di **sensori intelligenti** o ***smart sensor***. I sensori intelligenti hanno consentito una notevole semplificazione della misura oltre che l'ottimizzazione delle prestazioni dei sensori stessi. Lo sviluppo dei sensori intelligenti è legato non solo alle prestazioni che essi offrono, ma anche al note-

vole valore aggiunto rappresentato dal sistema di elaborazione e controllo. La riduzione delle dimensioni dei sensori ha comportato anche un notevole miglioramento delle prestazioni. Oggi, con l'avvento dei sensori ottici, si stanno sperimentando nuovi materiali in sostituzione del silicio. Si ha un uso sempre maggiore di sensori basati sulle fibre ottiche e nel campo della microfluidodinamica si impiegano vetro e plastica, oltre ad un particolare polimero, il polidimetilsilossano (PDMS).

Con le nanotecnologie molti ritengono che si sia raggiunto un limite che pone una serie di quesiti sui benefici di un ulteriore riduzione delle dimensioni del sensore, discutibile se non accompagnata da una possibile contestuale miniaturizzazione del sistema sul quale esso agisce. Per esempio il passaggio delle pompe da una scala macro ad una micro ha comportato grandi benefici alle industrie biochimiche e mediche, permettendo la realizzazione dei ***lab on a chip*** *(LOC)*, veri e propri laboratori chimici in miniatura, con riduzione dei costi di fabbricazione e dei reagenti, analisi più accurate e più veloci, maggiore sicurezza nell'esame di contaminanti e di sostanze radioattive, possibilità di analisi contemporanee di diversi campioni. Nei LOC sono pompate quantità di fluido contenente campioni biologici quali proteine, cellule, reagenti, dell'ordine dei micro e nanolitri, ma se si considera che particelle come i globuli rossi possono avere un diametro di qualche micron, si rischia l'impossibilità che esse fluiscano in condotti di dimensioni ad esse paragonabili.

In uno *smart sensor*, il sensore stesso può essere solo una piccola parte del *chip* e quindi l'ulteriore riduzione delle sue dimensioni dovrebbe essere presa in considerazione solo se si possono prevedere vantaggi in termini di funzionalità, in quanto in genere vi è più interesse ad ottenere migliori prestazioni che non a ridurre ulteriormente le dimensioni. Infatti in alcuni casi si è riscontrato che al di sotto di certe dimensioni il sensore riduce la sua sensibilità. In definitiva nel campo della sensoristica andranno esaminati caso per caso i vantaggi legati all'impiego delle nanotecnologie.

L'impetuoso sviluppo delle tecnologie elettroniche e informatiche, della elaborazione dei segnali ed il suo utilizzo nella strumentazione programmabile si sta riversando quindi anche nell'ambito della sensoristica. Particolare attenzione va posta a tutte quelle tecniche che consentono di operare in **tempo reale** e quindi alle problematiche del campionamento, delle conversioni dal continuo al discreto, della trasmissione dei segnali. Le potenzialità di un sensore intelligente sono notevoli e nel seguito se ne accenna ad alcune. È possibile stabilire, in base al tipo di grandezza in esame, il miglior metodo di misura, la portata, la frequenza di campionamento, l'accuratezza della misura, il modo di presentazione del risultato. Spesso i sensori intelligenti hanno la capacità di comunicare con altri sensori, con sistemi di supervisione e con l'operatore, di adattarsi a diverse esigenze autoriconfigurandosi, di regolare automaticamente la curva di taratura, di eseguire l'autodiagnosi.

Nella Fig. 1.1 si mostra una tipica applicazione di un sensore al test (DUT, *device under test*) e al controllo (DUC, *device under control*) di un dispositivo.

Come mostrato in figura il segnale in uscita al sensore è condizionato prima di essere inviato al microprocessore (μP), dal quale poi sono trasmesse le informazioni sia al sistema di visualizzazione, registrazione e comunicazione dei dati, sia, tramite un convertitore da digitale in analogico, all'attuatore che chiude la catena di controllo.

I segnali in uscita ad un sensore sono in genere tensioni elettriche con ampiezza variabile da pochi microvolt fino a qualche volt, possono cioè essere di piccola entità ed inoltre può anche essere presente un elevato rumore causato da interferenze e rumori esterni o generato all'interno dei circuiti elettronici del sensore, tale rumore può contenere componenti ad elevata frequenza di natura *random*. La tensione dei segnali in usci-

ta dai sensori deve essere amplificata, filtrata, convertita in forma digitale. Quindi all'interno del sistema di condizionamento del segnale si trovano amplificatori, filtri e **convertitori analogico digitali** (ADC). Inoltre il sensore deve essere schermato da possibili rumori od interferenze esterne. Come si dirà in seguito spesso il segnale in uscita al sistema è trasmesso in forma digitale ad una stazione remota, per cui si prevede anche un sistema di modulazione e demodulazione del segnale. La funzione del microprocessore è quella di elaborare il segnale proveniente dal sensore e di sovrintendere a tutte le operazioni del sistema.

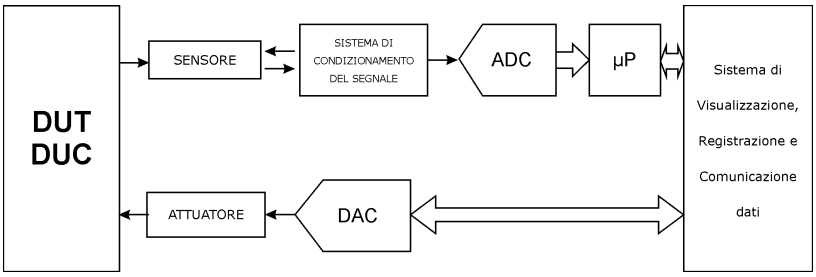

Figura 1.1 – Sensore inserito in una catena di test e controllo

Perché il segnale possa essere visualizzato su monitor o essere registrato si richiede spesso una sua forte amplificazione. Quindi gli amplificatori possono avere guadagni molto elevati anche superiori a 1000. Molto spesso il **guadagno** di un amplificatore è misurato in **decibel** (dB). Il guadagno lineare può essere trasformato in decibel mediante il logaritmo in base 10: *Guadagno(dB)=20 lg(guadagno lineare)*. L'ampiezza di banda nel dominio della frequenza di un amplificatore per sensori è data dalla differenza tra le frequenze di taglio superiore ed inferiore. Il guadagno a queste frequenze è 0,707 del guadagno in corrispondenza della frequenza centrale della banda. Si dice che tale guadagno è normalizzato ed ha un decremento rispetto al valore massimo del 70,7%. Poiché *3dB=20 lg(0,707)*, i punti corrispondenti alle frequenze di taglio sono denominati anche punti a *-3 dB* e presentano una potenza pari a metà di quella massima dell'amplificatore. Un altro parametro importante da tener presente in uno *smart sensor* è il **rapporto segnale rumore** o SNR (*signal-to-noise ratio*), definito come il rapporto tra la potenza del segnale e la potenza totale del rumore ipotizzate agenti sullo stesso sensore, assimilato ad una resistenza elettrica, pertanto indicate con P_s e P_n le potenze del segnale e del rumore e con V_s e V_n le rispettive tensioni, si ha: $SNR = P_s / P_n = V_s^2 / V_n^2$. Esso è espresso quasi sempre in decibel e simbolicamente anche con una barra tra *S* ed *N (S/N)*, per cui si può scrivere: $S/N = 10lg(P_s / P_n) = 20lg(V_s / V_n)$. L'SNR può variare da punto a punto del sistema di misura e quindi è opportuno misurarlo nei punti in cui si teme che possa essere particolarmente basso. Spesso dal segnale prelevato dal sensore è sottratta una tensione di riferimento, proveniente da un sensore non sollecitato dal misurando, identico a quello di misura e a questo posto in vicinanza, in modo che sia soggetto alle stesse interferenze e agli stessi rumori. Il segnale differenza risultante è amplifi-

cato e filtrato mediante un processo di *smoothing* per ridurre il rumore. La risposta relativamente bassa del sensore rende indispensabile il filtraggio del rumore. Normalmente il segnale analogico è convertito in digitale e ciò permette di migliorare l'SNR attraverso l'elaborazione successiva, comprensiva anche del filtraggio numerico, in quanto i filtri digitali sono più flessibili ed efficaci di quelli analogici.

In realtà per effettuare correttamente una serie di operazioni occorrono più sensori i cui segnali siano convertiti dal dominio del continuo in quello del discreto. Più il sistema da provare o controllare diventa complesso più cresce il numero di sensori, e si parla di sistema multisensoriale, in cui le informazioni di più sensori (***sensor fusion***) concorrono a definire la conoscenza di un fenomeno, di una macchina, di un ambiente. La ricerca e lo sviluppo nell'ambito dei sensori intelligenti tendono a intensificarsi in quanto forte è la domanda che proviene dal mondo industriale. Le linee di tendenza di questo sviluppo stanno essenzialmente in una maggiore integrazione tra sistema sensorio e sistema di elaborazione, in un trasferimento dei risultati conseguiti nell'ambito dell'intelligenza artificiale alla sensoristica. Probabilmente presto si passerà dal sensore intelligente al ***sensore esperto***.

Le fabbriche moderne sono fornite di un gran numero di sensori che permettono il monitoraggio delle variabili ambientali, oltre che d'alcune variabili specifiche all'interno delle macchine, in un sistema integrato, assistito da calcolatore. In tal modo si ha la possibilità di rilevare situazioni anomale ed anche d'avere indicazioni in tempi rapidi, sia di situazioni pericolose per le persone, sia di parti di macchine in avaria. In sistemi intelligenti, assistiti da calcolatori si è in grado anche di avere indicazioni sugli interventi da operare, sui tempi e sulle modalità d'intervento. In Fig. 1.2 è mostrato lo schema a blocchi di un sistema multisensoriale, in cui sono distinte le funzioni di **autotest** e di controllo. Certamente il modo più diffuso per passare dal continuo al discreto è, come mostrato in figura, quello di utilizzare un *convertitore analogico digitale* (ADC) e su questo principio si basa la maggior parte dei sensori intelligenti disponibili sul mercato. Essi prevedono nel sistema di condizionamento oltre all'amplificatore, un adattatore d'impedenza, un filtro per ridurre il rumore e un filtro *anti-aliasing*, per evitare gli errori dovuti al campionamento. I segnali in uscita agli ADC, attraverso un **multiplatore digitale** (MUX) da paralleli diventano seriali, il che ne facilita la trasmissione. Dal MUX i segnali sono convogliati sia su un processore di segnali digitali (DSP) sia su un bus di comunicazione. Il DSP governa sia il controllo della macchina tramite un controllore locale dedicato, un DAC e un attuatore, sia la funzionalità dei sensori. A questo scopo sono necessari ancora i DAC, filtri e regolatori, oltre ad una tensione di riferimento (in genere ottenuta stabilizzando una tensione continua con un **diodo *zener***), a **relé** ed interruttori non mostrati in figura.

La catena di controllo del sistema multisensoriale consente la scelta della portata dei sensori e della polarità, della frequenza di campionamento oltre che l'autoconfigurazione. Il bus di comunicazione interna permette ai segnali di raggiungere la stanza centralizzata di controllo dove si ha a disposizione un ***host-computer***. Il sistema di comunicazione è molto importante non solo nella fase di esercizio del sensore, ma anche in quella iniziale di verifica della taratura. Infatti a questo scopo si utilizza quasi sempre un sistema automatico di regolazione della curva di taratura gestito dall'*host-computer* che ha una notevole capacità di calcolo per poter eseguire tutte le operazioni necessarie allo scopo. Il bus di comunicazione può trasmettere i segnali anche all'esterno.

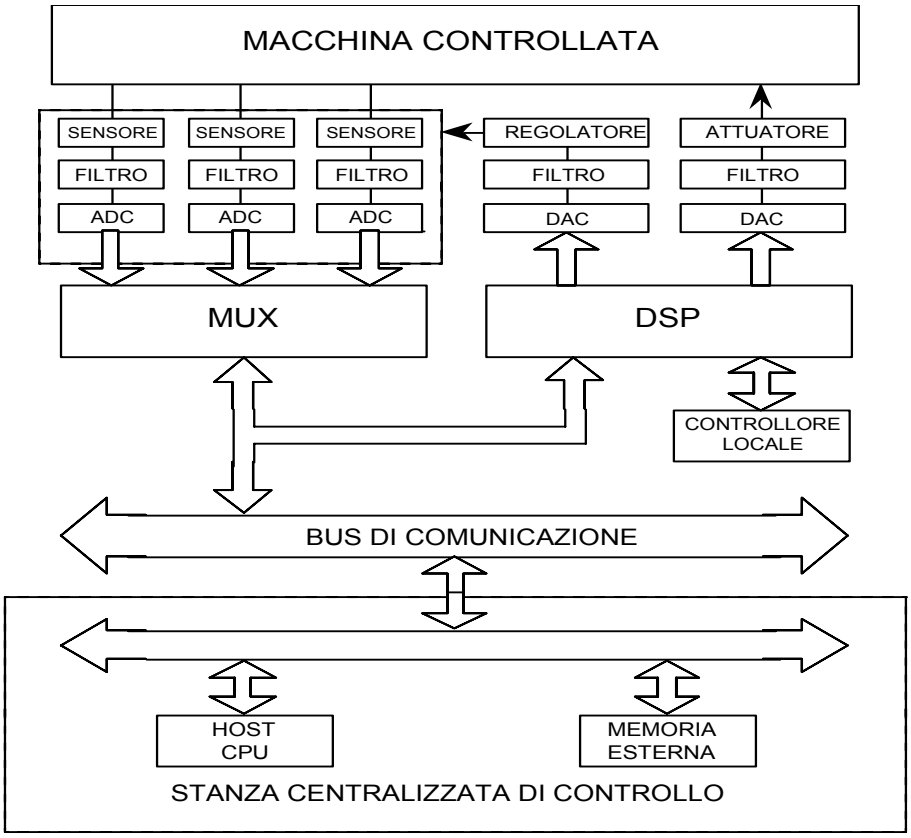

Figura 1.2 – Schema a blocchi di un sistema multisensoriale

Oggi si vanno sempre più affermando reti di sensori distribuiti spazialmente, anche in luoghi diversi, detti ***web sensor***, che trasmettono i segnali ad un computer remoto per l'elaborazione, utilizzando protocolli di comunicazione e interfacce standard (come ad esempio la IEEE 1451). Essi sono già impiegati, a volte ancora in fase sperimentale, in diversi campi quali il monitoraggio ambientale, il telerilevamento da satellite, la gestione dei trasporti, le informazioni per le forze dell'ordine, la gestione di impianti di sicurezza non presidiati, il monitoraggio di situazioni calamitose, operazioni SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), controlli industriali, e si stanno molto sviluppando nel campo della telemedicina, con svariate applicazioni. L'approccio utilizzato è del tipo orientato agli oggetti (*object-oriented*), un modo molto efficiente per generare schemi standard di gestione ed interpretazione dei dati provenienti dai sensori. I sensori intelligenti possono avere anche una codifica digitale diretta e in tal caso il segnale digitale, in genere disponibile in forma parallela, è prelevato all'uscita del sensore e inviato in ingresso al microprocessore. Dispositivi di questo tipo sono rari. Come esempio si può considerare un ***encoder***, un misuratore di spostamento lineare o angolare costituito da un disco circolare sul quale è stampigliato un opportuno schema, che consente la codifica diretta. Il disco è normalmente calettato su un albero e come questo ruota si genera una codifica differente per ogni posizione misurabile. La codifica può avvenire per

contatto, per via magnetica o per via ottica. Quella per contatto richiede la presenza di spazzole con tutti i problemi che queste comportano. Quella magnetica utilizza dei **sensori ad effetto Hall**, sensibili alla presenza o meno di un campo magnetico. Questo tipo di codifica non soffre dell'usura delle spazzole e quindi assicura una vita utile maggiore al sensore. La codifica ottica è quella che si va diffondendo sempre più in quanto consente i maggiori livelli di accuratezza. Fondamentalmente un codificatore ottico è costituito da tre componenti: un disco segmentato composto da parti trasparenti e opache; una sorgente di luce, solitamente un diodo ad emissione di luce LED (*light emitting diode*), con un sistema di lenti ottiche focalizzatrici e collimatrici; dei rivelatori di luce costituiti da tante celle fotoelettriche, ad esempio **fotodiodi** o **fototransistor**, in grado di captare il fascio fornito dal LED. La risoluzione del sensore dipende dal numero di settori circolari costituenti il disco a ciascuno dei quali è associato un fotorivelatore e un bit, questi tipi di codificatori sono in grado di rivelare spostamenti dell'ordine del micron.

Altri tipi di sensori convertono la grandezza fisica da misurare in una serie di impulsi che sono inviati ad un contatore digitale (*counter*) che fornisce in uscita il segnale digitale disponibile in forma parallela in ingresso al microprocessore. Un esempio tipico è rappresentato da un misuratore di velocità angolare, costituito da un disco forato, calettato sull'asse di un organo in movimento. Una sorgente di luce invia un segnale rilevabile dall'altra parte del disco mediante una cella fotoelettrica che converte il segnale di velocità del disco in una serie di impulsi a frequenza variabile in dipendenza della velocità stessa.

Grande sviluppo alla sensoristica industriale specie nei settori militare, biomedico, automobilistico e aeronautico è stata data dai **MEMS** (*Micro-Electro-Mechanical Systems*). I MEMS sono l'integrazione di elementi meccanici, di sensori, di attuatori e dell'elettronica per il condizionamento e l'elaborazione del segnale su un unico substrato di silicio, ottenuto attraverso le moderne tecnologie di microfabbricazione. I MEMS quindi rappresentano un'importante fusione della tecnologia dei circuiti integrati (IC) con la più avanzata tecnologia micromeccanica. L'acronimo MEMS risale agli anni Novanta anche se la tecnologia per la realizzazione di micro macchinari è nota già dagli anni Cinquanta, quando si scoprì che silicio e germanio manifestavano un **effetto piezoelettrico**. Questa tecnologia comprende un insieme piuttosto vario di processi che consentono di modellare sulle tre dimensioni uno o più *wafer* di silicio. Anche se il silicio è il materiale più utilizzato, sono stati impiegati anche *wafer* di vetro e di quarzo. Nei MEMS ai noti processi per la realizzazione di circuiti integrati si affiancano quelli di micromacchine in grado di realizzare componenti meccanici in scala micro per la fabbricazione di dispositivi elettromeccanici denominati ***systems on a chip***, tra i quali anche i già citati *lab on a chip*. La presenza dei microsensori, in grado di rivelare la presenza di grandezze meccaniche, termiche, biologiche, chimiche, ottiche ed elettromagnetiche, insieme con quella dei microattuatori, capaci di muovere, posizionare, regolare, pompare e filtrare, fornisce ai MEMS straordinarie capacità di percezione e controllo e ne amplia le possibilità d'impiego in diversi campi con la realizzazione di dispositivi a più basso costo e con più elevati livelli di funzionalità ed affidabilità rispetto a quelli realizzati in scala macro. Questi benefici sono ottenuti proprio dalla riduzione dei costi di sensori ed attuatori, che tra l'altro nei MEMS raggiungono l'affidabilità dei circuiti integrati. Si sta ottenendo un ulteriore miglioramento delle prestazioni attraverso sistemi sia di trasmissione dati senza fili, sia di protezione dalle elevate temperature.

Senza dubbio uno dei maggiori benefici derivante dalla simbiosi tra elementi elettronici e meccanici è quello di permettere a molti circuiti MEMS di non richiedere l'im-

piego di batterie per l'alimentazione elettrica dei sensori. Come sarà meglio chiarito in seguito, la maggior parte dei sensori è di natura passiva, per cui si richiede l'impiego di una alimentazione esterna, costituita in genere da una batteria, con tutti i problemi legati ai costi di manutenzione della batteria e ai rischi di mal funzionamento dovuti a un deterioramento della stessa. La possibilità di utilizzare sensori auto alimentanti ne amplia enormemente l'uso. L'auto alimentazione deriva dalla conversione effettuata nei MEMS di energia meccanica in elettrica, energia quasi sempre più che sufficiente dato il bassissimo consumo di potenza richiesto al funzionamento dei circuiti integrati. L'energia meccanica convertita in elettrica è quella che deriva dal movimento dell'oggetto su cui è montato il sensore. Quando il sensore opera su un automobile o un aeromobile o un qualsiasi motore o un braccio o una gamba di un essere vivente la trasformazione di energia è semplice, più complessa quando il misurando è rappresentato da un oggetto apparentemente statico. In realtà in natura tutto è in movimento, in particolare il pavimento sul quale camminiamo è sollecitato da vibrazioni che diventano più intense con il passaggio di autoveicoli nelle strade adiacenti all'edificio nel quale ci troviamo. I MEMS più moderni iniziano a sfruttare l'energia di queste vibrazioni per la loro auto alimentazione, rendendo, come si può intuire, il futuro di questi dispositivi sempre più affascinante. In sintesi i vantaggi dei MEMS rispetto ai dispositivi tradizionali riguardano un minore consumo energetico con possibilità di auto alimentarsi, migliori caratteristiche di funzionamento, un peso ridotto e costi inferiori, in quanto la fabbricazione in serie riduce i costi di produzione e di assemblaggio. Le tecnologie di fabbricazione dei MEMS in gran parte sono quelle impiegate nella realizzazione dei circuiti integrati come per esempio l'uso di basette di silicio, di *film* sottili e dei metodi foto litografici. Sulla superficie di un *wafer* di silicio si realizzano in scala micrometrica i componenti del dispositivo rimuovendo chimicamente strati di ossido. Con la sempre maggiore diffusione dei MEMS si sono già messi a punto diversi processi di fabbricazione alcuni dei quali anche differenti da quelli tipici degli IC. I tre processi principali sono quelli di **deposizione** di film sottili di materiale su un substrato, di **applicazione di una maschera** con lo schema circuitale sulla base del film attraverso la **fotolitografia** e di **incisione della maschera** sul *film*. Lo spessore dei *film* sottili varia in genere da un centinaio di micrometri fino a pochi nanometri.

Il processo di **deposizione** può avvenire per reazione chimica o fisica. Nel caso si impieghi una reazione chimica le tecniche più utilizzate sono l'**elettrodeposizione** se i *film* sono di materiale conduttivo, come rame, oro o nichel e la **crescita epitassiale** su un substrato isolante sul quale si diffonde il silicio o l'arseniuro di gallio, tecnica che ha il vantaggio di essere molto rapida e di consentire la realizzazione di *film* di spessori variabili da pochi micrometri a un centinaio di micrometri. Nel caso si impieghi una reazione fisica le tecniche più utilizzate sono l'evaporazione e lo *sputtering*. L'**evaporazione** può avvenire o impiegando un fascio di elettroni o un riscaldamento resistivo. Nello ***sputtering*** il materiale è rilasciato dalla sorgente ad una temperatura molto più bassa di quella che si ha nell'evaporazione. In questa tecnica un gas inerte, di solito argon, è portato allo stato plasmatico tramite una radiazione in genere a radiofrequenza. Gli ioni di argon, colpendo la superficie della sorgente, estraggono atomi che condensano su tutte le superfici compreso il substrato.

La **fotolitografia** nei MEMS prevede il trasferimento di uno schema circuitale su un materiale fotosensibile, in grado di modificare le sue proprietà fisiche quando è sottoposto all'esposizione selettiva ad una sorgente di radiazione luminosa. Ovvero si realizza lo schema desiderato in quanto il materiale fotosensibile mostrerà caratteristiche diverse nelle regioni che sono state esposte alle radiazioni, da quelle non esposte. Il materiale

fotosensibile è un polimero che varia la propria solubilità in base all'azione della radiazione agente su di esso. La parte non esposta può essere selettivamente rimossa nella successiva fase di lavorazione. I MEMS sono realizzati strato dopo strato per successive litografie. Particolarmente delicate nelle tecniche litografiche sono le fasi sia di allineamento al *wafer* delle diverse maschere necessarie alla realizzazione dei componenti, sia di esposizione alle radiazioni del materiale fotosensibile, perché questo modifichi le sue proprietà nel modo desiderato.

L'**incisione** della maschera sul *film* è una tecnologia basata sull'asportazione di materiale e può avvenire per via chimica, dissolvendo il materiale da asportare mediante una soluzione liquida, o a secco, impiegando ioni reattivi o lo *sputtering* o corrodenti in fase vaporosa. La tecnologia per via chimica è più semplice e meno costosa, purché si disponga di una soluzione in grado di dissolvere selettivamente il materiale da asportare. Purtroppo nel caso del silicio facce diverse del cristallo presentano caratteristiche chimiche diverse, il che può portare ad un errore nello spessore asportato con alterazioni nelle caratteristiche previste in sede di progetto. L'incisione a secco con ioni reattivi è ottenuta mediante un plasma che produce ioni reagenti con il materiale da asportare. Il processo per *sputtering* è analogo a quello esaminato per la deposizione, solo che in questo caso il substrato sostituisce la sorgente e subisce il bombardamento degli elettroni. Infine l'incisione in fase vapore prevede l'introduzione in un'apposita camera di uno o più gas reattivi, che formano prodotti gassosi per il substrato da asportare. In genere si usa acido fluoridrico gassoso per l'asportazione dell'ossido di silicio o fluoruro di xenon per l'incisione del silicio.

Attualmente i sensori basati sui MEMS sono principalmente quelli di pressione, di accelerazione, di velocità, di forza e di flusso oltre ai già citati biosensori. I sensori di pressione trovano largo impiego nel settore automobilistico e in quello biomedicale, dove si stanno diffondendo dispositivi usa e getta, dopo il successo dei misuratori di glucosio. I MEMS per misurare l'accelerazione e i giroscopi hanno trovato il mercato più ampio nell'ambito degli *airbag* per autovetture. I sensori di velocità hanno trovato il principale mercato nei GPS su automobili, cellulari e palmari, mentre quelli di forza sono impiegati nella fabbricazione di bilance. Nel seguito si accennerà ad altre applicazioni dei MEMS, in fase di sviluppo.

2 - Classificazione e rappresentazione dei sensori

Introduzione

Nella trattazione dei sensori si trovano diversi modi di **classificazione**: **per tecnologia e principio fisico** che essi utilizzano (ottico, piezoelettrico, fotoelettrico, fotovoltaico, ecc.); per **funzione** che essi svolgono o **per grandezza da misurare** (lunghezza, temperatura, pressione, vibrazione, ecc.); **per settore** cui essi sono destinati (agricoltura, siderurgia, chimica, manufatturiero, ecc.); **per dispositivo** interessato alla misurazione (macchine utensili, motori, variatori, cuscinetti, pompe, compressori, valvole, saldatrici, forni, ecc.).

Le *diverse classificazioni* sono adottate in modo alternativo in diversi testi. La prima, quella **per tecnologie**, riesce a dare una visione ragionevolmente integrata dei processi utilizzati nella realizzazione dei sensori e risulta particolarmente utile al progettista di sensori. Essa evidenzia lo stato dell'arte e le possibilità che un dato principio fisico soddisfi una determinata richiesta, purtroppo è poco utile quando uno desideri comparare i pregi e i difetti di sensori in grado di misurare una stessa grandezza. Ad esempio se si ha da scegliere un termometro occorrerebbe andare ad esaminare separatamente le sessioni riguardanti i dispositivi resistivi, quelli termoelettrici, quelli a semiconduttore, i pirometri. Anche una classificazione **per settore** può risultare utile a chi operi in un certo campo, ma, a parte la difficoltà di individuazione dei tanti settori in cui si utilizzano i sensori, essa darebbe luogo a ripetitività o a continui rinvii, in quanto uno stesso sensore viene correntemente adoperato in diverse aree. La classificazione **per dispositivo** interessato alla misurazione, mettendo in evidenza i particolari requisiti dei sensori in relazione alle differenti applicazioni e fornendo una panoramica dei sensori utilizzabili per eseguire misure su un determinato macchinario, è particolarmente utile agli specialisti. Da un punto di vista dell'utente senza dubbio la migliore classificazione è quella **per grandezze** da misurare in quanto consente di stabilire subito quali siano i sensori disponibili con le loro caratteristiche. È evidente che una classificazione per funzioni deve soprattutto mettere in evidenza i particolari requisiti dei sensori in relazione alle differenti applicazioni, dando una panoramica delle varie proprietà fisiche utilizzabili per eseguire una determinata misura. In tal modo l'utente potrà operare la sua scelta in base alle necessità, tenendo conto del rapporto costi benefici. Purtroppo molti testi classificando i sensori per grandezze da misurare spesso tendono ad assumere la veste di un catalogo con la giustapposizione di dispositivi privi di un minimo di correlazione, perdendo molto spesso di scientificità. Nella seconda parte di questa introduzione alla sensoristica industriale si seguirà una classificazione per grandezze da misurare con particolare riferimento alla temperatura, allo spostamento, alla forza, alla pressione, alle vibrazioni, alla velocità, all'accelerazione, al flusso. In questa prima parte si fornisce in-

vece una sintetica visione dei processi fisici che presiedono la trasformazione da una forma di energia all'altra nei diversi trasduttori. Si descriveranno sensori da anni utilizzati a livello industriale e alcuni che si affacciano in maniera promettente sul mercato. Infine si cercherà di dare un quadro dei possibili futuri sviluppi nel campo della sensoristica.

2.1 - Sensori passivi ed attivi

Per completezza di trattazione si accenna ad un altro tipo di classificazione dei sensori che si trova in alcuni testi, riprendendo un concetto presente nell'elettronica. I sensori possono suddividersi in **passivi** (detti anche a **modulazione**) quando richiedono potenza dall'esterno (ad esempio in forma di energia elettrica) per fornire un segnale di tensione o di corrente e in **attivi** (detti anche ad **auto-generazione**), quando non richiedono una potenza esterna per fornire l'indicazione derivata dalla grandezza fisica da misurare.

I **sensori attivi** forniscono un'indicazione derivata semplicemente dalla grandezza fisica in ingresso. I trasduttori di questo tipo sfruttano diversi effetti fisici quali quelli piezoelettrico, fotoelettrico, fotovoltaico, elettromagnetico e termoelettrico. Poiché l'indicazione è in genere un segnale elettrico limitato dal valore del misurando fisico o chimico, questi tipi di trasduttori tendono ad avere un segnale d'uscita a bassa energia, per cui in genere richiedono una amplificazione.

Un esempio di classificazione sulla base della natura attiva o passiva dei sensori è fornito nelle Tabelle 2.1 e 2.2.

Tabella 2.1 – Esempi di sensori attivi

Classi ed esempi	Natura del sensore	Misurando
Sensori ad equipaggio mobile	Movimento relativo tra magnete ed equipaggio	Velocità di vibrazione, velocità di spostamento
Termocoppie	Metalli dissimili a diverse temperature	Temperature, radiazioni flussi di calore
Sensori piezoelettrici	Compressione del quarzo o altro cristallo	Vibrazioni, accelerazioni, suoni, pressioni
Celle fotovoltaiche	Generazione in semi conduttori di tensione dalla luce solare	Esposizione, luce

I **sensori passivi** agiscono come impedenze elettriche. Il misurando può produrre una variazione nei parametri geometrici (volume, superficie, lunghezza, ecc.) o una variazione delle proprietà elettriche (resistività, permettività, permeabilità, ecc.). Anche se è molto importante tener presente che le variazioni nei parametri geometrici frequentemente producono anche variazioni nelle proprietà elettriche.

Tabella 2.2 – Esempi di sensori passivi

Classi ed esempi	Natura del sensore	Misurando
Resistore a filo	Resistenza variabile	Dimensioni, spostamento
Strain gage	Resistenza variabile	Sforzi, forze, coppie, pressioni
Termometri a resistenza	Spira o termistore	Temperatura
Igrometro a resistenza	Variazioni di resistività	Umidità relativa
Radiometro a termistore	Radiazioni su bolometro	Inseguimento di missili
Sensore a spira calda	Spira riscaldata elettricamente	Variazioni di flusso, turbolenze
Misuratore di spessori	Misura di resistenza	Spessori, livelli
Sensore a riluttanza	Variazioni di riluttanza	Posizione, spostamenti
Sensore a correnti-parassite	Variazioni di induttanza	Spessori, spostamenti
Trasformatori differenziali	Nucleo magnetico mobile	Spostamenti, posizioni, forze
Sensore a magnetostrizione	Proprietà magnetiche	Suoni, pressioni, forze
Misuratori di traferro	Variazioni di induttanza	Pressioni, spostamenti
Sensore ad effetto *Hall*	Effetti elettromagnetici	Correnti, tensioni, potenze
Condensatore variabile	Variazioni capacità	Spostamenti, pressioni
Microfono a condensatore	Variazioni capacità	Voce, musica, vibrazioni
Celle fotoconduttive	Radiazioni	Relé sensibili alla luce
Tubi fotoemissivi	Emissione di elettroni	Relé fotosensibili
Misuratori di ionizzazione	Flusso di elettroni	Radiazioni e particelle

Di queste variazioni occorre tener conto in quanto esse possono alterare sensibilità e accuratezza del sensore. La variazione nei parametri geometrici può essere dovuta a una forza, a uno spostamento, a una vibrazione, a una velocità, ecc. La variazione nelle proprietà elettriche è dovuta generalmente a umidità, temperatura, pressione, forza, coppia, radiazione luminosa.

In alcuni testi accanto ai sensori passivi (o a modulazione) e a quelli attivi (o ad autogenerazione) si contempla un terzo gruppo cui appartengono i sensori noti come **modificatori** (in alcuni testi sono classificati come **convertitori**), che hanno la prero-

gativa di avere la stessa forma di energia all'ingresso e all'uscita con caratteristiche modificate.

2.2 - Rappresentazione dei sensori

Come si è accennato in precedenza diversi sono gli effetti fisici che si utilizzano nei sensori. Proprio la loro attuale espansione non consente di essere esaustivi nell'esame dei principi fondamentali di funzionamento su cui si basano tutti i sensori oggi in commercio. Le possibilità offerte dall'**intelligenza artificiale** hanno infatti permesso di far ricorso a principi e tecniche operative un tempo abbandonate. Le innovazioni tecnologiche nell'ambito dei materiali fanno intravedere il superamento degli attuali limiti di alcuni sensori. Nel seguito si propone semplicemente una sintesi dei principi di funzionamento sui quali si basa una larga parte dei trasduttori oggi disponibili in commercio. L'esame degli effetti fisici utilizzati nei sensori richiede una schematizzazione delle varie forme in cui l'energia si manifesta. Una interessante e ormai famosa rappresentazione tridimensionale dei sensori è stata proposta nel 1981 da *Middelhoek e Noorlag*. In essa sono considerate le seguenti sei forme di energia:

1) energia elettromagnetica radiante;
2) energia meccanica;
3) energia termica;
4) energia elettrica;
5) energia magnetica;
6) energia chimica.

Alcuni autori aggiungono alle sei forme di energia prese in esame da *Middelhoek e Noorlag* anche una settima costituita dall'energia idraulica, distinta dalla meccanica, per evidenziare i progressi compiuti dai sensori basati sulla microfluidodinamica (*lab on a chip*). Le sei forme di energia precedentemente indicate si possono presentare sia in ingresso (in tal caso sono riportate lungo l'asse x di uno spazio cartesiano) sia in uscita (in tal caso si riportano lungo l'asse y dello spazio cartesiano) sia come fonte ausiliaria esterna per consentire il funzionamento del sensore (in tal caso si riportano lungo l'asse z dello spazio cartesiano).

In base a questa rappresentazione è evidente che nel piano xy saranno contenuti tutti i **sensori attivi**. In totale nel piano xy si possono presentare 36 combinazioni tra le energie del misurando e del segnale in uscita al sensore. Trenta di queste trentasei combinazioni sono scambi energetici che si riferiscono a forme diverse di energia tra segnali di ingresso e uscita, mentre sei a forme uguali di energia (si tratta in tal caso di **modificatori** o **convertitori**). Tra i trenta scambi di energie diverse i più importanti sono cinque e precisamente quelli che prevedono in uscita energia elettrica, anche se assumeranno in futuro rilevanza i cinque scambi che presentano in uscita energia elettromagnetica radiante.

Se risulta indispensabile per il funzionamento del sensore un apporto esterno di energia, occorre considerare nella rappresentazione del sensore la componente dell'energia lungo l'asse z. In tal caso si tratta di **sensori passivi** e le possibili combinazioni tra le componenti in gioco dell'energia lungo i tre assi risultano duecentosedici. Ancora una volta i sensori più diffusi sono quelli che prevedono un apporto di energia elettrica dall'esterno.

In Fig. 2.1 sono rappresentati a titolo di esempio, tra i tanti possibili, i sensori con energia elettrica in uscita. Uno attivo nel piano *xy* con energia termica in ingresso ed elettrica in uscita è ad esempio una **termocoppia**. Uno passivo nello spazio *xyz* con energia meccanica in ingresso ed elettrica sia in uscita sia come fonte ausiliaria è ad esempio un **potenziometro**.

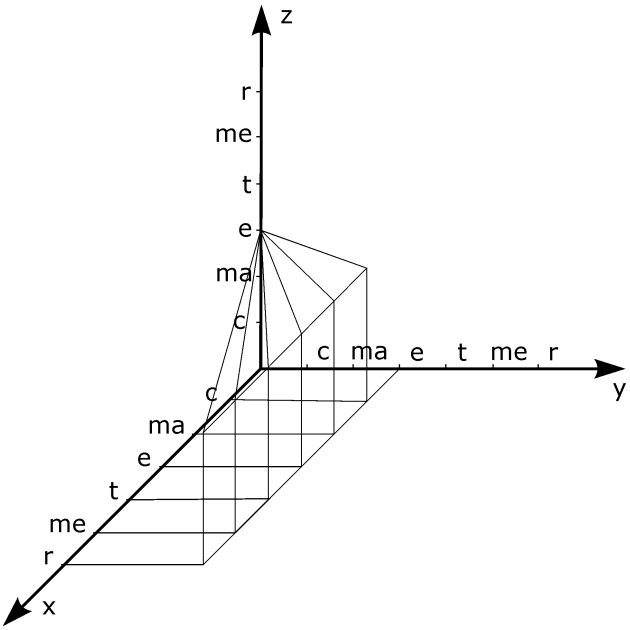

Figura 2.1 - Rappresentazione tridimensionale dei sensori

3 - Caratterizzazione dei sensori

Introduzione

I recenti sviluppi nel campo dei sistemi di progettazione, produzione e controllo assistiti dal calcolatore hanno elevato notevolmente la qualità dei prodotti, rendendo obbligatorio eseguire diversi tipi di misure in modo estensivo. Questo ha incentivato la realizzazione di strumentazione, che impiega un gran numero di sensori, sempre più automatizzata e con prestazioni inimmaginabili fino a qualche decennio fa. Nel seguito non si farà distinzione tra sensori e trasduttori e si parlerà prevalentemente di sensori, anche se quanto si scriverà nella maggior parte dei casi è applicabile ad entrambi.

Le caratteristiche dei sistemi di misura e dei sensori in esso contenuti dipendono prevalentemente dal tipo di funzione che essi sono chiamati a svolgere e dalle applicazioni. In ogni caso è di importanza basilare verificare che lo strumento ed in particolare i sensori rispondano ai requisisti richiesti. Assume quindi rilevanza sempre crescente la **caratterizzazione**, ovvero la descrizione delle loro caratteristiche tecniche. Riprendendo la metafora dei sensori come parte essenziale del corpo di un sistema gestito dalla mente, rappresentata da un microprocessore, occorre ricordare la massima latina: "*mens sana in corpore sano*", che è dovuta a *Giovenale* e rivela la stretta relazione esistente tra mente e corpo, nota fin dall'antichità. Come un corpo sano aiuta la mente a dare il meglio di sé e una mente sana consente al corpo di svolgere pienamente le sue azioni, così solo dei sensori rispondenti alle loro caratteristiche aiuteranno il microprocessore a dare il meglio di sé, sempre che il microprocessore sia stato ben progettato e non si guasti. Ciò presuppone che, come si sottopone il microprocessore a frequenti *test*, utilizzando in genere algoritmi di *autotest*, anche i sensori siano soggetti a periodiche verifiche o a validazioni, dove per **verifica** si intende la condizione di evidenza oggettiva che un dato sensore soddisfi ai requisiti specificati, mentre per **validazione** si intende una verifica che i requisiti specificati siano adeguati ad un determinato uso. Una delle verifiche riguarda l'**incertezza strumentale** del sensore, che è una componente dell'incertezza della misura e che in genere è fornita dal costruttore nelle specifiche o è ottenuta tramite una taratura del sensore, che sarà esaminata dettagliatamente in seguito.

Uno strumento, un sensore saranno tanto più facilmente utilizzabili e integrabili in un sistema automatico di produzione, quanto più saranno note e verificate le loro caratteristiche tecniche, la qualità e affidabilità, le modalità di manutenzione. Altri requisiti particolarmente richiesti riguardano gli aspetti ergonomici, il rispetto di vincoli ambientali e un buon rapporto prezzo-caratteristiche. Le specifiche di un sensore o più in generale di un sistema di misura, in grado di caratterizzarne il funzionamento in determinate e diversificate condizioni, sono, in genere, fornite dal costruttore. Naturalmente i parametri caratteristici sono definiti entro certi limiti o valori estremi, che spesso continuano ad essere indicati in ambito industriale come **tolleranze**, termine non più ammesso dal VIM, che invita a sostituirlo con le dizioni **massimi errori ammessi** o **limiti di errore**.

Questi dati consentono di delimitare una **fascia d'incertezza** per ogni sensore. Nel seguito si tenterà di fornire una sintesi delle principali caratteristiche di un sistema di misura in grado di definirne il suo funzionamento in condizioni di regime sia stazionario sia dinamico o transitorio.

3.1 - Parametri fondamentali dei sensori

La scelta di un sensore, che ha il compito di conservare inalterata l'informazione contenuta nel segnale d'ingresso, rendendola disponibile in uscita, si basa su una serie di considerazioni che si è tentato di parametrizzare. Nel seguito si mostrerà come caratterizzare un sensore, descrivendo le sue caratteristiche metrologiche statiche, dinamiche, ambientali e di qualità. In questo paragrafo si vuole semplicemente accennare ad alcuni parametri fondamentali che è indispensabile conoscere per una scelta meditata del sensore.

Il primo problema che si pone è definire il **misurando**, ovvero la grandezza che si intende misurare. Il VIM nella prima nota alla definizione di misurando afferma che la sua specificazione richiede la conoscenza della **natura della grandezza** e la descrizione dello stato del fenomeno, del corpo o della sostanza di cui la grandezza è una proprietà, includendo le entità chimiche in gioco. Nella terza nota si sottolinea la necessità della **correzione**, intesa come compensazione di un **effetto sistematico** noto, infatti, la presenza del sensore altera le condizioni iniziali del sistema in prova e non consente la misura del valore che il misurando assumeva prima della presenza del sensore. Questo effetto sistematico può essere valutato nella sua entità, in modo che si possa compensare, correggendo la misura.

Un sensore per espletare le sue funzioni segue un **metodo** di misura, per il quale s'intende la sequenza logica di operazioni, descritte in modo generico, impiegate nell'esecuzione delle misure stesse. Per meglio dettagliare il procedimento di misura si definisce la **procedura**, intesa come l'insieme di operazioni, descritte in modo specifico, utilizzate nell'esecuzione di particolari misure, in accordo ad un metodo prefissato. Un sensore inserito singolarmente in uno strumento di misura dà luogo ad un **metodo diretto** di misura, mentre un sistema multisensoriale comporta il ricorso ad un **metodo indiretto**, in cui si risale al risultato di una misura dalla combinazione delle misure dirette effettuate dai diversi sensori su parametri funzionalmente legati al misurando.

In letteratura per qualificare la bontà di un sensore si incontrano diversi termini, come quelli di **accuratezza** e **precisione**. Molto spesso si usa un termine per l'altro, dando luogo a grande confusione. È bene chiarire che l'accuratezza e la precisione di una misura eseguita con un sensore sono concetti prevalentemente qualitativi. Esse dipendono sia dalla qualità dei sensori utilizzati, sia dalla esperienza degli operatori nella loro utilizzazione. Si intende per **accuratezza** il grado di approssimazione fra un valore di una grandezza misurata e quello che si definisce **valore vero** di un misurando. Il concetto di valore vero, quantità ritenuta unica e non conoscibile, è legato alla tradizionale definizione di errore, inteso come differenza tra il valore della grandezza misurata e quello del suo valore vero, in parte superato con l'introduzione dell'incertezza nella GUM (*Guide to the Expession of Uncertainty in Measurement*), dove la parola vero è considerata ridondante. Il VIM definisce **errore** la differenza tra il valore della grandezza misurata e quello di una grandezza di riferimento, derivante ad esempio da un campione di misura. Il VIM inoltre invita a non confondere l'accuratezza con la **veridicità** di misura, intesa come il grado di approssimazione di un numero ripetuto di misure di una grandezza ad

un valore di riferimento della grandezza stessa. La veridicità di una misura varia in senso inverso con l'errore sistematico di misura, mentre non ha nessuna relazione con gli errori aleatori. Si definisce **errore sistematico** la componente dell'errore di misura che in misure ripetute resta costante o varia in modo prevedibile. Si definisce invece **errore aleatorio** la componente dell'errore di misura che in misure ripetute varia in maniera imprevedibile. Alla veridicità è associato il ***bias*** del sensore, definito come la differenza tra la media di indicazioni ripetute del sensore e un valore di riferimento della grandezza oggetto della misura. Perché si possa effettuare la **correzione** in un sensore è necessario conoscerne il *bias*.

Normalmente si parte dal concetto di accuratezza per introdurre la **taratura** di un sensore, che sarà precisata in seguito, e per far comprendere che ottenere una misura precisa, ovvero ripetibile non fornisce assicurazioni sulla bontà della misurazione e del sensore, se esso non è stato recentemente tarato e se la misura non è stata corretta, ovvero depurata dagli effetti o errori sistematici. Nonostante le norme internazionali consiglino di considerare l'accuratezza, così come la precisione, concetti qualitativi e non quantitativi, spesso sui cataloghi o sui fogli illustrativi dei sensori si trova quantificata la loro accuratezza. Si trova scritto che un sensore presenta un'accuratezza dello *0,1 %*, il che, se preso alla lettera starebbe a significare che esso fornisce delle pessime prestazioni. In modo del tutto qualitativo si dovrebbe dire semplicemente che il sensore presenta un'ottima accuratezza. In altre parole si può affermare che, in modo improprio, l'accuratezza è spesso espressa numericamente attraverso l'**inaccuratezza**, quantificata mediante l'**incertezza strumentale** del sensore.

La **precisione** di una misura è intesa come il grado di approssimazione fra le indicazioni o i valori della grandezza misurata ottenuti da misure ripetute sullo stesso oggetto o su oggetti simili in condizioni specificate. La precisione di una misura a volte è espressa numericamente attraverso l'**imprecisione**, quantificata mediante la deviazione standard (scarto tipo nella norma italiana) o la varianza o un coefficiente di variazione, calcolati in condizioni specificate delle misure ripetute. Il VIM associa al concetto di precisione quelli di ripetibilità e di riproducibilità dei risultati delle misure. Si definisce **ripetibilità** la precisione ottenuta operando in un insieme di condizioni ripetibili. Si intendono condizioni ripetibili quelle che comprendono misure eseguite sullo stesso oggetto o su oggetti simili in un breve periodo di tempo, nella stessa postazione e nelle stesse condizioni operative, seguendo la stessa procedura, impiegando gli stessi operatori e lo stesso sistema di misura. Si definisce inoltre **riproducibilità** la precisione ottenuta operando in un insieme di condizioni riproducibili. Si intendono condizioni riproducibili quelle che comprendono misure ripetute sullo stesso oggetto o su oggetti simili, in diverse postazioni, utilizzando diversi sistemi di misura che possono seguire anche procedure differenti, con l'impiego anche di vari operatori. Il VIM introduce inoltre la definizione di **precisione intermedia** di misura, per cui le condizioni di misura includono la stessa procedura, la stessa postazione e misure ripetute sullo stesso oggetto o su oggetti simili, in un periodo di tempo esteso, ma che possono includere altre condizioni, comprendenti anche variazioni, come nuove tarature, nuovi calibratori, operatori o nuovi sistemi di misura.

Sorge ora il problema se una misura precisa è anche accurata e viceversa. Ebbene si può affermare che la precisione è un requisito auspicabile ma non sufficiente per assicurare accuratezza. Ovvero si auspica che una misura accurata sia anche precisa e rappresentabile con un sufficiente numero di cifre significative, ma una misura precisa non è detto che sia anche accurata. Infatti si ipotizzi di avere uno strumento digitale che permetta di leggere sei cifre della grandezza da misurare e inoltre di eseguire diverse misu-

re abbastanza vicine tra loro. Si può affermare di avere eseguito una misura precisa, nell'ipotesi che più misure si scostino poco tra loro, ma non è detto che essa sia accurata, potendo lo strumento risultare non correttamente tarato o potendo aver perso le sue caratteristiche nel tempo a causa di degradazione di componenti o per motivi accidentali. In alcune applicazioni, come per esempio nel controllo di processo, spesso si richiede ripetibilità delle indicazioni, ovvero un'ottima precisione, che risulta più importante dell'accuratezza.

Per una semplice comprensione della differenza tra accuratezza e precisione spesso si fa riferimento al tiro con l'arco. Si pensi ad un bersaglio costituito da tante corone circolari attorno al cerchio centrale, che simula il misurando, mentre i tiri sono le misure. Quando si effettuano diversi tiri e le frecce si concentrano nel cerchio centrale le misure sono accurate e precise, se invece sono sparse su tutte le corone circolari, dalle più centrali alle più estreme, allora le misure non sono né accurate né precise. Può però capitare che le frecce, pur essendo distanti dal cerchio centrale, siano molto vicine tra loro, in tal caso le misure saranno precise, ma non accurate. Soffermiamoci su questa condizione. Le frecce vicine tra loro lasciano supporre buona abilità da parte del tiratore. Perché allora le frecce non sono finite nel cerchio centrale? Probabilmente a causa di un effetto sistematico dell'arco, per esempio di un non corretto allineamento del mirino (se l'arco ne dispone di uno) o della corda non tesa bene. Correggendo questi effetti sistematici, ovvero nel caso di un sensore, effettuando una sua regolazione, si potranno avere tiri, ovvero risultati, precisi ed accurati. D'altra parte il costruttore dell'arco può anche aver evidenziato l'effetto sistematico nel foglio di accompagnamento dello strumento, indicando la correzione da apportare, in termini di scostamento del tiro dal cerchio centrale. L'arbitro della gara può allora accettare come validi i tiri, se riscontrasse che, una volta apportata la correzione, i tiri risulterebbero tutti nel cerchio centrale. Un'ultima condizione si può verificare quando il livello di accuratezza richiesto non è elevato e si ritengono accettabili i tiri all'interno non solo del cerchio centrale, ma anche della prima corona circolare vicina al cerchio centrale. Se le frecce sono sparse lungo la circonferenza della suddetta corona circolare, ma ne cadono all'interno, i tiri, ovvero i risultati, saranno accurati, ma non precisi. Questa condizione permette di chiarire un aspetto importante della sensoristica in campo industriale. Il fine del costruttore è certamente quello di realizzare sensori con le migliori prestazioni possibili, tenendo sempre in conto il bilancio costi benefici. Tutto sta ad intendersi su quali sono le prestazioni del sensore che lo rendono idoneo all'uso. Un sensore è idoneo quando rispetti la sua **classe di accuratezza** (quasi sempre nei testi italiani indicata come **classe di precisione**), indicata con un numero o un simbolo, ovvero soddisfi requisiti metrologici stabiliti, tesi a mantenere gli errori di misura o le incertezze strumentali entro limiti specificati in relazione a determinate condizioni operative. Quindi è importante che il sensore rispetti le specifiche indicate dalla normativa vigente per la particolare applicazione in cui esso sarà impiegato. Riprendendo la metafora del tiro con l'arco, l'arco sarà idoneo se assicurerà ai tiri di cadere nel cerchio centrale e nella prima corona ad esso adiacente, quando questo è previsto dal regolamento della gara. È inutile perfezionare l'arco perché i tiri cadano nel cerchio centrale, specie se ciò comporta una spesa aggiuntiva. Tale perfezionamento sarà necessario solo se il regolamento della gara riterrà validi solo i tiri che raggiungono il cerchio centrale. Non va sottaciuta a questo punto la necessità di abilità, che deriva dall'esperienza, da parte del tiratore. Un arco idoneo nelle mani di un inesperto non fornirà risultati soddisfacenti. Un sensore nelle mani di chi non lo sa usare serve a molto poco. Per passare da indicazioni prevalentemente qualitative sulla bontà di una misura, ottenibili attraverso l'accuratezza e la precisione, a rappresentazioni quantitative

del risultato di una misura, occorre quantificare l'incertezza che è un parametro sia qualitativo sia quantitativo. Qualitativamente essa rappresenta il grado di dubbio sulla validità del risultato di una misura, quando invece essa deve fornire un'indicazione quantitativa va accompagnata dall'aggettivo appropriato. Qualsiasi misura è soggetta a limitazioni, quando si fornisce il risultato di una misura è necessario dare anche un'indicazione sull'incertezza della misura stessa. Si definisce **incertezza** un parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori della grandezza attribuiti al misurando sulla base delle informazioni utilizzate. Una di queste informazioni è rappresentata proprio dall'**incertezza strumentale** del sensore. La definizione dell'incertezza presuppone l'esistenza del misurando all'interno di una fascia di valori, che dipende da uno scarto tipo o deviazione standard, stabilita in base ad un ben preciso livello di confidenza. Ne deriva chiaramente che l'analisi dell'incertezza richiede semplicemente il ricorso ai principi noti della probabilità e della statistica. L'abbandono dell'approccio deterministico rende superata e inutile la definizione di valore vero del misurando, che è un'entità non conoscibile, ma rende più difficile la comprensione di come migliorare l'accuratezza di una misura. L'incertezza del risultato di una misura riflette la mancanza dell'esatta conoscenza del valore del misurando e quindi il risultato di una misura dopo la correzione è solo una stima del valore del misurando. L'incertezza di misura in generale comprende più componenti ed è data da una deviazione standard o dalla semi-ampiezza di un intervallo, avente un livello d'incertezza stabilito. Essa, in alcuni casi particolari, può anche essere espressa, in modo tradizionale, semplicemente dall'**errore** possibile da cui è affetto il valore stimato del misurando. Si definisce **incertezza standard** (o **tipo**) quella rappresentata da una deviazione standard.

Un altro parametro importante per la scelta del sensore è l'intervallo tra il più piccolo e il più grande valore della grandezza, ovvero l'**intervallo nominale**, definito come l'insieme dei valori della grandezza compresi entro due estremi approssimati di indicazione, ottenibili con una particolare posizione dei controlli del sensore, utilizzati per determinare tale posizione. La differenza tra questi due valori estremi prende il nome di **campo** dell'intervallo nominale. Oltre all'intervallo nominale il VIM riporta la definizione di **intervallo di misura** o **intervallo di lavoro**, inteso come l'insieme dei valori delle grandezze della stessa natura che possono essere misurate da un determinato sensore, caratterizzato da una specificata incertezza strumentale in determinate condizioni. Quindi se si vuole che il sensore non esca dalle specifiche legate all'incertezza fornita dal costruttore, ovvero funzioni correttamente, occorre far riferimento all'intervallo di misura. Il costruttore è tenuto a fornire le **condizioni operative assegnate** o **di targa**, definite come quelle che devono essere soddisfatte durante la misura perché il sensore operi conformemente ai suoi dati di progetto. Nelle condizioni operative devono essere assegnati i valori sia del misurando sia delle grandezze d'influenza più temibili. Il costruttore deve fornire anche le **condizioni operative limite**, definite come quelle che il sensore è in grado di sopportare senza danneggiarsi e senza degradazione delle caratteristiche metrologiche specificate, quando poi torni ad operare nelle condizioni assegnate. Tra le condizioni operative assegnate si riporta la massima indicazione del sensore, detta **portata** o **valore di fondo scala**, indicato sinteticamente con l'acronimo **FSO** (*full-scale output*). Tra le condizioni operative limite del sensore si riporta il valore di **sovraccarico**, inteso come il valore limite che può assumere il misurando senza che il funzionamento del sensore resti permanentemente alterato rispetto alle specifiche.

Un altro problema che si pone è legato al **principio di funzionamento** del sensore. Solo una buona conoscenza dei principi fisici alla base del funzionamento del sensore può consentire un suo uso corretto. Purtroppo non sempre dalle specifiche fornite dal

costruttore è facile evincere in modo inequivocabile il principio di funzionamento di un sensore. Solo l'esperienza personale gioca un ruolo fondamentale in questo campo. È necessario inoltre precisare i **parametri di uscita** del sensore e quindi la sua natura in genere elettrica di tipo analogico o digitale. Altri parametri utili sono la **potenza erogabile** che il sensore può fornire in uscita all'interno delle sue specifiche, l'**impedenza di uscita** che il sensore presenta ai morsetti di uscita, utile soprattutto per poter progettare correttamente un dispositivo di adattamento di impedenze. Nel caso di sensori passivi un parametro importante è rappresentato dal valore della tensione o della corrente che deve essere fornita da una **sorgente di alimentazione** esterna o ausiliaria per consentire il corretto funzionamento del sensore.

3.2 - Caratteristiche di un sensore

Si è già accennato che per un corretto impiego dei sensori è necessario conoscere le loro prestazioni. A loro fa riferimento sia il progettista del sistema nel definire le specifiche necessarie per il buon funzionamento, sia il costruttore quando indica la qualità del prodotto.

Nel definire le caratteristiche di un sensore, si può rappresentarlo come un blocco in grado di trasferire l'informazione e l'energia in ingresso all'uscita in forma invariata o convertita. Allo scopo di studiare nel modo più completo possibile il funzionamento di un sensore, nel seguito si esamineranno le seguenti caratteristiche: **stazionarie**, **dinamiche**, **ambientali**, **di qualità e affidabilità.**

Le **caratteristiche metrologiche stazionarie** sono quelle che fanno riferimento alle **condizioni di regime permanente** definite come quelle condizioni operative del sensore nelle quali la relazione ottenuta durante la taratura resti valida anche quando il misurando vari nel tempo. Esse descrivono il comportamento di un sensore in condizioni di funzionamento normale, quando il misurando subisce variazioni molto lente e in assenza di urti, vibrazioni o accelerazioni (a meno che una di queste non debba essere oggetto di misura).

Le **caratteristiche metrologiche dinamiche** sono relative alla risposta del sensore alle variazioni con il tempo del misurando, quando non è più valida la relazione tra i segnali di ingresso e di uscita ottenuta durante la taratura. La caratteristica dinamica è definita mediante un'opportuna **funzione di trasferimento**. Mentre la maggior parte delle prestazioni può essere riferita alla caratteristica in regime stazionario, è opportuno conoscere anche la caratteristica dinamica per una corretta utilizzazione del sensore, anche nelle condizioni di funzionamento in condizioni di regime permanente.

Le **caratteristiche metrologiche di qualità e affidabilità** sono relative alla vita operativa (o al cosiddetto numero di cicli) di un sensore, alle possibili cause del suo malfunzionamento e alla sua capacità di soddisfare le esigenze del cliente.

Le **caratteristiche metrologiche ambientali** si riferiscono al comportamento di un sensore dopo l'applicazione (caratteristiche ambientali non operative) o durante l'applicazione (caratteristiche ambientali operative) di una o più grandezze di influenza.

È bene precisare che solo raramente accade che l'indicazione y del sensore sia funzione, oltre che del tempo, della sola variabile in ingresso x (misurando), in genere essa dipende, anche se in misura ridotta, da altre grandezze fisiche denominate **grandezze d'influenza** o a volte anche fattori perturbanti, capaci di modificare più o meno e in modo generalmente non desiderato la relazione tra l'indicazione del sensore e il misu-

rando. Il VIM definisce d'influenza quella grandezza che in una misura diretta, come sinteticamente mostrato in Fig. 3.1, non ha un effetto sulla grandezza che si sta misurando, ma altera la relazione tra l'indicazione, in questo caso del sensore, e il risultato di misura. È bene chiarire quanto esposto, prendendo a riferimento per esempio l'effetto termico. La temperatura agirà sia sul misurando sia sul sistema di misura, mentre la variazione sul misurando è legata a una proprietà del sistema sotto osservazione e rappresenta quindi qualcosa che va rivelata, l'effetto di temperatura sul sensore è indesiderato e quindi va effettuata la correzione dell'errore derivante da tale effetto. Per eseguire la correzione non è sufficiente misurare le variazioni di temperatura, ma è anche necessario conoscere con precisione la legge di dipendenza dalla temperatura della curva di taratura del sensore.

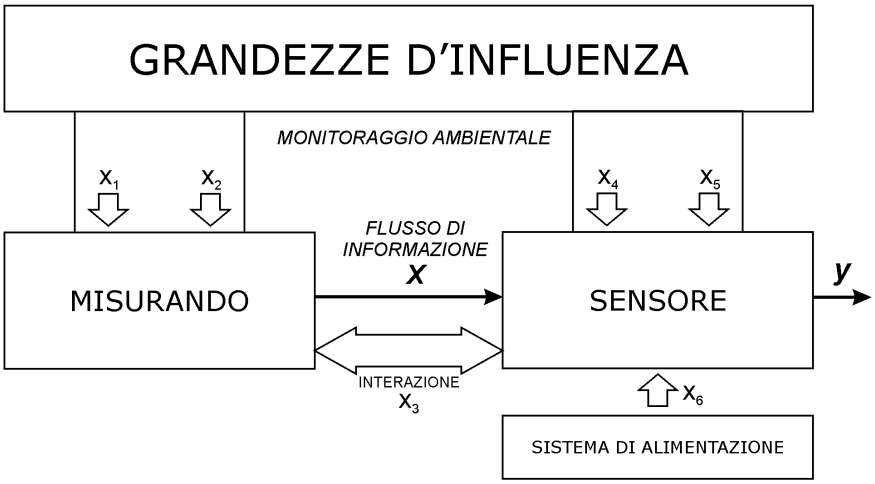

Figura 3.1 - Schema di un sensore con alcune possibili interazioni

Nella figura è evidenziato anche come la presenza del sensore alteri le condizioni iniziali del sistema in cui esso è inserito e non consenta la misura del valore che il misurando assumeva prima dell'inserzione. L'entità dell'interazione varia con il tipo di sensore usato per la misura. Se il sensore è passivo ha bisogno di un sistema di alimentazione, il quale introduce quasi sempre del rumore. Una misura inoltre richiederebbe sempre un attento monitoraggio ambientale, per definire la sensibilità del sistema alle grandezze d'influenza. Quando non sia possibile trascurare nella risposta del sensore gli effetti indesiderati, attribuibili alle grandezze d'influenza, occorre introdurre delle correzioni, che possono essere effettuate in fase di elaborazione del segnale in uscita, noti che siano gli effetti delle grandezze di influenza sul sensore stesso. Dalla figura si nota che le grandezze d'influenza agiscono anche sul misurando, alterandone le caratteristiche. Come si è detto, tali alterazioni sono molto spesso oggetto della misura e il sensore sarà tanto più pregiato quanto più riuscirà a distinguere le variazioni del segnale in uscita, attribuibili a fluttuazioni del misurando, da quelle addebitabili al suo normale funzionamento influenzato da perturbazioni dell'ambiente esterno. Le crescenti potenzialità

dei microprocessori rendono possibili tali correzioni, si richiede semplicemente l'utilizzazione di altri sensori, sensibili alle grandezze d'influenza i cui effetti sul sensore collegato al misurando non siano trascurabili, nel senso che le variazioni nel segnale in uscita, determinati da queste grandezze, risultino superiori all'incertezza strumentale del sensore stesso. Per esempio la temperatura è un parametro che è sempre presente nei fenomeni fisici e chimici, pertanto nella quasi totalità dei casi, quando si misura una grandezza bisognerà tener conto dell'influenza della temperatura sul sensore e quindi sulla relazione esistente tra i segnali x ed y. Ecco perché è ormai invalso nell'uso dotare tutti i sistemi automatici di misura di un sensore termico.

3.3 - Taratura o calibrazione

Per stabilire in modo compiuto il valore del segnale di uscita di un sensore in condizioni di regime stazionario del misurando occorre che sia nota una serie di parametri che definiscono le caratteristiche metrologiche in regime permanente. La più importante fra queste caratteristiche è la curva di taratura o calibrazione. Purtroppo spesso si fa confusione tra taratura e regolazione della caratteristica, per cui nel seguito si cercherà di chiarire la loro differenza. Per **taratura** o **calibrazione** si intende l'operazione che, in condizioni specificate, in una prima fase stabilisce una relazione tra i valori della grandezza misurata con dei campioni di misura (tenendo conto delle loro incertezze di misura) e le corrispondenti indicazioni del sensore, con associate le sue incertezze strumentali, e in una seconda fase utilizza questa informazione per stabilire una relazione, che consenta di ottenere il risultato di misura da un'indicazione del sensore. Attraverso la taratura si determina l'**incertezza strumentale del sensore**, valutata in genere come semi ampiezza dell'intervallo di massimo scostamento tra i valori del misurando corrispondenti ad una stessa indicazione del sensore. Perché la taratura sia effettuata correttamente l'incertezza strumentale del sensore deve essere grande in confronto con le incertezze di misura associate ai valori della grandezza ottenuti dai campioni di misura. Il costruttore è tenuto ad indicare le **condizioni operative di riferimento** definite come quelle prescritte per la valutazione delle prestazioni del sensore o per il confronto dei risultati di misura. La specifica delle condizioni operative durante la taratura richiede che siano forniti gli intervalli dei valori sia del misurando sia delle grandezze d'influenza.

L'espressione grafica, per esempio su un piano cartesiano, della relazione tra l'indicazione del sensore, posta su un asse, e il corrispondente risultato di misura, posto sull'altro asse, è definita come **diagramma di taratura.** In genere ad una stessa indicazione del sensore corrispondono diversi valori della grandezza misurata, i cui valori limite superiori ed inferiori definiscono la **fascia d'incertezza** (a volte erroneamente denominata banda d'errore) e permettono la valutazione dell'incertezza strumentale del sensore. Per eseguire la taratura si deve disporre di un generatore variabile del misurando, in grado di fornire valori in tutto il campo di misura del sensore, e di uno strumento di misura, assunto come campione e, quindi, con un'incertezza strumentale molto minore di quella del sensore in prova. Si fa variare il misurando entro tutto il campo di misura del sensore e si ripete il ciclo diverse volte, registrando su un grafico e in una tabella per ogni indicazione del sensore la corrispondente misura fornita dallo strumento assunto come campione. Per facilitare la raccolta dei dati si possono fissare in genere da otto a dodici valori dell'indicazione del sensore e si opera sul generatore variabile finché non si abbiano quelle indicazioni in uscita al sensore, in corrispondenza delle quali si registrano le misure fornite dallo strumento campione. Si eviti di fissare, in modo alternati-

vo, i valori del misurando e di registrare le corrispondenti indicazione del sensore, in quanto queste hanno meno cifre significative dello strumento campione. Raccordando i punti superiori del grafico, in corrispondenza delle diverse indicazioni del sensore precedentemente fissate, e i punti inferiori, si delineano due curve che delimitano la fascia d'incertezza. All'interno di tale fascia d'incertezza si può ricavare una relazione biunivoca, in modo tale che ad una indicazione del sensore corrisponda uno ed un sol valore della grandezza misurata, generalmente il valor medio fra quelli relativi ad ogni singola indicazione del sensore.

Questa curva è definita **curva di taratura** e non dà indicazioni sull'incertezza. Pertanto quando si fornisce la curva di taratura ad essa va associata l'incertezza strumentale del sensore o una tabella di taratura o una serie di funzioni che consentano di delimitare la fascia d'incertezza. In realtà l'utente è interessato principalmente a conoscere l'incertezza strumentale del sensore sull'intero campo di misura. Il costruttore quindi in genere fornisce semplicemente il valor massimo della semi ampiezza della fascia d'incertezza, esprimendo tale incertezza strumentale o in valore assoluto o in valori percentuali riferiti alla portata o valore di fondo scala (% FSO). Il diagramma e la curva di taratura forniscono informazioni sul comportamento del sensore in condizioni di regime permanente. Quando la curva di taratura è riconducibile ad una retta, il sensore è caratterizzato da un'unica costante che lega ingresso e uscita, denominata **costante di taratura** del sensore.

Un sensore ideale presenta una relazione tra ingresso e uscita ben definita data da una curva di taratura teorica, che, come si è detto, può essere fornita dal costruttore in forma di equazione matematica, di grafico o di tabella di valori. La curva teorica ideale è quella rappresentata da una linea retta. Lo scostamento della curva reale da quella ideale è dovuto a varie cause di errore, le più frequenti fra le quali sono la non linearità, la deviazione dallo zero e le variazioni di sensibilità. La conoscenza degli effetti di queste cause di errore può consentire di effettuare la loro correzione mediante un'opportuna regolazione e quindi di aumentare la veridicità delle misure.

Si è detto che il legame $y=f(x)$ tra il misurando x e l'indicazione del sensore y in condizioni di regime stazionario potrebbe essere rappresentato da una costante, condizione auspicabile, in quanto presupporrebbe una relazione lineare tra i segnali d'ingresso e di uscita dal sensore, rendendo applicabile l'importante principio di sovrapposizione degli effetti. L'importanza di avere una relazione lineare tra misurando e indicazione del sensore è tale che, come sarà meglio evidenziato nel paragrafo successivo, spesso il sensore è dotato di una serie di componenti aggiuntivi per la linearizzazione della caratteristica. Le relazioni fra i due segnali possono essere scritte nel modo seguente:

$$y = k\,x \qquad\qquad x = k_t\,y$$

Il parametro k è la **sensibilità** del sensore definita come il rapporto tra la variazione dell'indicazione del sensore e la corrispondente variazione del valore della grandezza misurata. Essa è legata alla pendenza della curva di taratura. Un sensore è tanto più pregiato quanto più è elevata la sua sensibilità, in quanto ciò implica che è sufficiente una piccola variazione del misurando per avere un'elevata indicazione facilmente misurabile. La sensibilità non va confusa con la **risoluzione**, definita come la minima variazione del misurando che dà luogo a una variazione percettibile della corrispondente indicazione. La risoluzione può essere espressa come valore assoluto o percentuale, riferito alla massima indicazione (FSO) del sensore e in genere può avere diversi valori in differenti

parti del campo di misura. Il VIM precisa che per la determinazione della sensibilità la variazione da dare al misurando deve essere superiore a quella che serve a valutare la risoluzione. La risoluzione, a sua volta è spesso confusa con la **banda morta** (termine molto diffuso tra i tecnici dell'industria), definita come l'intervallo massimo all'interno del quale si può far variare il misurando in entrambi i sensi senza che si produca una variazione rivelabile nella corrispondente indicazione del sensore. La sensibilità non va neanche confusa con la **selettività** del sensore, definita come la proprietà del sensore, impiegato in una specifica procedura di misura, nella quale esso fornisce i valori della grandezza da misurare, in presenza di uno o più misurandi, in modo tale che i valori di ogni misurando siano indipendenti dagli altri misurandi o da altre grandezze presenti nel fenomeno, nel corpo o nella sostanza oggetto dell'esame. Per esempio se il sensore è impiegato per misurare una sola componente di un segnale multifrequenziale, esso sarà tanto più selettivo quanto meno la sua indicazione sarà disturbata dalle altre componenti o da altri segnali a frequenza differente da quella che si vuole misurare.

Il parametro k_t è la costante di taratura del sensore che è il rapporto tra il segnale di ingresso e il segnale di uscita in risposta all'ingresso. Essa è un parametro che ha dimensioni date dal rapporto delle unità di misura del misurando e di quella di uscita (nel caso di un sensore di spostamento con in uscita una tensione elettrica si ha che la costante di taratura è espressa in metri al volt o, con una dizione preferita a livello internazionale, metri per volt). La costante di taratura è il fattore per cui va moltiplicata l'indicazione del sensore al fine di ottenere il valore del misurando e che, in base alle relazioni precedentemente scritte, risulta l'inverso della sensibilità. Le relazioni scritte precedentemente presuppongono che la curva di taratura non solo sia una retta, ma che passi anche per l'origine degli assi cartesiani, caratterizzanti il piano (x,y). Questa condizione non sempre si verifica a causa della presenza di soglie, grandezze note anche con il termine inglese molto diffuso di *offset*. Il VIM definisce una **soglia di discriminazione** come la più grande variazione del valore del misurando che non produce alcuna variazione rivelabile nella corrispondente indicazione del sensore. In realtà le oscillazioni della caratteristica intorno allo zero possono causare l'insorgere sia di una **soglia** sia di un'indicazione del sensore presente anche in assenza di segnale in ingresso, in alcuni testi inglesi indicato come piedistallo, che può essere sia positivo sia negativo. L'insorgere di una soglia di discriminazione può essere causato dalla **deriva strumentale** del sensore, ovvero da una variazione continua o incrementale nel tempo di un'indicazione, dovuta ad alcune variazioni nelle proprietà metrologiche del sensore.

Quando, come spesso accade, l'indicazione del sensore è di natura elettrica è possibile controllare la deriva e correggere gli effetti sistematici dovuti agli *offset*, riportando la curva di taratura del sensore a ripartire dall'origine. Questo aggiustamento rientra nella **regolazione** del sensore, definita come l'insieme di operazioni eseguite sul sensore in modo che esso fornisca le indicazioni prescritte corrispondenti a determinati valori del misurando. La regolazione non dovrebbe essere confusa con la taratura, che è un suo prerequisito, anzi a rigore, dopo la regolazione il sensore dovrebbe essere ritarato. Per effettuare la regolazione basterà aggiungere o sottrarre, mediante un dispositivo sommatore-sottrattore, in uscita al sensore una grandezza uguale ed opposta a quella di *offset*, in modo da riportare la retta nella posizione iniziale. La **deriva strumentale** del sensore può causare non solo problemi di *offset*, ma anche di variazioni della pendenza della retta con una conseguente modifica della costante di taratura. Per comprendere come effettuare la correzione di questo ulteriore effetto sistematico, si consideri la relazione $y = k\,x$. Quando l'indicazione del sensore è di natura elettrica il contributo prevalente alla sensibilità k è dato dal guadagno di un amplificatore o di una catena di amplificatori, posti a

valle del sensore. Sarà quindi sufficiente dotare tale catena di un amplificatore a guadagno variabile, in modo che con una sua opportuna regolazione si riporti il valore della pendenza della retta, ovvero della sensibilità e quindi della costante di taratura, che è il suo inverso, ai valori iniziali o nominali, indicati nelle specifiche del sensore.

Quando il campo nominale del sensore non comprenda lo zero, la regolazione, ovvero le correzioni da apportare in seguito alla deriva strumentale del sensore, risultano leggermente più complesse. In tal caso è necessario conoscere i valori limite del campo di misura e le corrispondenti indicazioni del sensore. Si indichino con (x_{min}, y_{min}) e (x_{max},y_{max}) le coordinate dei punti relativi ai suddetti valori. Per apportare la correzione generalmente si applica all'ingresso del sensore il valore x_{min} del misurando e si aggiunge o sottrae a monte dell'amplificatore una grandezza tale da render nullo il segnale in ingresso all'amplificatore e quindi l'indicazione del sensore. Con questa operazione si è fatta traslare la retta facendola passare per il punto di coordinate (x_{min},*0*). All'ingresso dell'amplificatore si ha tensione nulla che non influenza il valore del suo guadagno. Poiché al valore del misurando x_{min} deve corrispondere l'indicazione nota y_{min} del sensore, occorre attraverso un sommatore aggiungere in uscita all'amplificatore una tensione pari proprio a y_{min}, in modo tale che al valore x_{min} del misurando corrisponda l'indicazione y_{min} del sensore. A questo punto si applica al sensore un valore del misurando pari a x_{max} e, agendo sull'amplificatore a guadagno variabile, si fa assumere alla retta la pendenza corrispondente alla sua costante di taratura nominale, condizione raggiunta quando la tensione in uscita all'amplificatore risulta pari a y_{max} - y_{min}, in modo tale che la corrispondente indicazione del sensore sia y_{max}, visto che all'uscita dell'amplificatore è sempre sommata una tensione pari a y_{min}. Quindi, anche in questo caso, impiegando due semplici sommatori-sottrattori, uno a monte e uno a valle dell'amplificatore, con una sola traslazione della caratteristica e una sola variazione del guadagno si sono apportate le correzioni necessarie a riportare il sensore all'interno delle sue specifiche. Al termine di queste operazioni il sensore è stato regolato. Quando queste operazioni sono effettuate automaticamente, si dice che il sensore è dotato della **funzione** di **autoregolazione** della curva di taratura, come mostrato nello schema a blocchi di Fig. 1.2. Spesso questa operazione è detta impropriamente autotaratura. Poiché l'autoregolazione può essere eseguita frequentemente e allo scopo di non sollecitare indebitamente il sensore con il valore massimo del suo misurando si scelgono coppie di valori misurando-indicazione differenti da quelle limiti del campo nominale. Ciò presuppone che la caratteristica non si discosti da un andamento lineare, il che consente di considerare due punti qualsiasi, purché non troppo vicini tra loro, per le inevitabili incertezze che accompagnano tutti i processi di misura.

Un altro effetto sistematico più difficile da correggere è rappresentato dall'**isteresi** che è la massima differenza tra le indicazioni del sensore corrispondenti al medesimo misurando quando la misura è eseguita procedendo per valori prima crescenti e poi decrescenti del misurando stesso nell'ambito del suo intervallo di misura. Essa dà luogo ad un errore sistematico in genere espresso in per cento del fondo scala, è presente in diversi componenti ed è causata da un ritardo nell'azione di un elemento. Valori diversi dell'isteresi si presentano al variare del campo di escursione del misurando. Essa è massima quando il misurando varia dall'inizio della scala fino al fondo scala e viceversa. Un errore analogo a quello causato dalla presenza dell'isteresi è quello di frizione, presente ad esempio nei potenziometri dove una spazzola scorre su delle spire.

Al costruttore si richiede di assicurare la ripetibilità delle misure durante tutta la vita utile del sensore, quali che siano le grandezze d'influenza che su esso possano agire. La ripetibilità nel tempo è detta **stabilità**, definita come la proprietà del sensore di conser-

vare le sue caratteristiche metrologiche costanti nel corso del tempo. Quanto più sarà stabile il sensore tanto minore sarà nel tempo il numero di regolazioni da apportare alla curva di taratura.

Per ottenere la curva di taratura, una volta disponibile il diagramma di taratura, si possono utilizzare diversi algoritmi matematici, il metodo più utilizzato è quello dei minimi quadrati, noto anche con l'acronimo inglese LSM (*least square method*). L'algoritmo LSM è ormai disponibile non solo tra i pacchetti *software* di statistica, ma anche nelle calcolatrici scientifiche tascabili. Si assume per ogni indicazione del sensore il valor medio fra quelli del misurando relativi alla suddetta indicazione. Operando in tal modo si ottengono tante coppie di coordinate, in numero n, quante sono le indicazioni del sensore prefissate in sede di taratura (come si è detto in precedenza, in genere si fissano da otto a dodici indicazioni), ottenendo altrettanti punti sperimentali sul piano cartesiano. Si inizia con il fissare come curva teorica una retta di equazioni $y=k_1x+q$, dove k_1 è la sensibilità di misura e q rappresenta il valore del possibile *offset*. Per il calcolo dei due parametri k_1 e q, si applica l'LSM, minimizzando la somma degli scarti quadratici fra i punti sperimentali sul piano cartesiano e la retta di equazione data, tale somma è definita **funzione obiettivo**, F. Si passa poi a fissare come curva teorica una quadratica, per esempio del tipo $y=k_2x^2+k_1x+q$, e si applica nuovamente l'LSM. Se il minimo della nuova funzione obiettivo è inferiore a quello ottenuto per la retta vorrà dire che la funzione quadratica raccorda i punti sperimentali meglio di quanto non avvenga con la retta. Si passa quindi a fissare come curva teorica una cubica, per esempio del tipo $y=k_3x^3+k_2x^2+kx+q$, e si applica nuovamente l'LSM. Se il minimo della nuova funzione obiettivo è inferiore a quello ottenuto per la funzione quadratica vorrà dire che la funzione cubica raccorda i punti sperimentali meglio di quanto non avvenga con le due curve precedenti. Il processo si ferma non appena la curva di taratura rientra all'interno della fascia di incertezza, specie se tale funzione è una retta, in quanto la caratteristica rettilinea è particolarmente apprezzata negli strumenti di misura. Si può anche verificare che lo scarto tipo o deviazione standard σ della funzione obiettivo, calcolata come la radice quadrata della stessa funzione diviso per il numero n di punti sperimentali, $\sigma=(F/n)^{1/2}$, risulti minore della semi ampiezza del massimo scarto misurato sulla fascia d'incertezza, ovvero dell'incertezza strumentale del sensore.

Quando si effettua la **verifica** della taratura si assume come curva teorica di riferimento per l'applicazione per esempio dell'LSM quella fornita dal costruttore. La verifica della taratura è positiva se l'ampiezza massima della fascia d'incertezza misurata è inferiore al doppio dell'incertezza strumentale indicata dal costruttore. Tra i dati della verifica che si forniscono vi è anche il massimo scarto tra la curva di taratura sperimentale ricavata e quella fornita dal costruttore.

Quando la curva di riferimento è una retta si fornisce l'**errore di linearità**, che è un'indicazione di quanto la curva di taratura si discosti dall'andamento rettilineo. A significare la sua rilevanza si fa presente che l'errore di linearità è una delle caratteristiche indicate dal costruttore nel foglio illustrativo o nel manuale di accompagnamento del sensore. L'errore di linearità, indicato molto spesso semplicemente come linearità, è espresso in funzione del valor massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita.

Esistono tanti tipi di linearità quanti sono i modi di stabilire la retta di riferimento. La **linearità riferita alla retta teorica** è relativa ad una retta di equazione $y=kx$, che passa per lo zero e per il punto che ha coordinate prefissate, senza alcun riferimento a valori misurati. Se queste coordinate corrispondono al cento per cento del fondo scala sia del misurando sia dell'indicazione del sensore, si ha la cosiddetta **linearità terminale**.

La **linearità riferita agli estremi** è relativa alla retta che si ottiene congiungendo i punti estremi ottenuti durante la taratura del sensore. In tal caso in genere si richiede che siano fornite le incertezze con cui sono stati ottenuti questi punti estremi. La **linearità indipendente** è riferita alla retta "migliore" ottenuta come linea media tra due rette parallele il più vicino possibile tra loro e in grado di avere al loro interno tutti i valori misurati nel corso della taratura. La **linearità secondo i minimi quadrati** fa riferimento alla retta ottenuta applicando il metodo dei minimi quadrati, ovvero minimizzando la somma dei quadrati degli scostamenti. Si trovano anche altri tipi di linearità ottenute imponendo il passaggio della retta da punti prefissati, come ad esempio quello corrispondente al misurando nullo (**linearità riferita allo zero**), ma quelle precedentemente esaminate sono le più utilizzate.

3.4 - Linearizzazione della curva di taratura

Da quanto esposto precedentemente è evidente la rilevanza che assume la linearità nella definizione delle caratteristiche di un sensore. Con un una funzione lineare è possibile sia applicare il principio di sovrapposizione degli effetti, sia risalire al valore del misurando dall'indicazione del sensore attraverso facili operazioni di prodotti o divisioni e somme o sottrazioni, tutte disponibili in semplici strutture elettroniche o nelle prestazioni di un elaboratore numerico. Purtroppo raramente la funzione $y=f(x)$ che lega il misurando x all'indicazione y del sensore è di tipo lineare. In molti casi, però, con opportuni accorgimenti è possibile ricondurre la curva di taratura ad una retta o, per meglio dire, far rientrare una retta all'interno della fascia d'incertezza e fornire l'errore di linearità in funzione dello scostamento massimo tra tale retta e la reale curva di taratura. Si pensi, per fare semplici esempi, a funzioni quadratiche o esponenziali, è possibile effettuare l'operazione descritta in zone limitate delle curve rappresentative di tali funzioni. Ne scaturiscono due possibili soluzioni per la linearizzazione o considerare un intervallo di misura limitato o linearizzare a tratti la caratteristica, suddividendo il campo in tanti intervalli di misura ciascuno caratterizzato da una diversa costante di taratura. Questa soluzione attualmente è la più adottata per la facilità di realizzazione attraverso l'elaborazione numerica. Infatti, in genere il sensore è dotato di un sistema automatico di scelta della portata. Il microprocessore in corrispondenza della portata scelta ricava il valore del misurando x in genere da un'equazione del tipo $y=kx+q$, avendo memorizzati in corrispondenza di quella portata i corrispondenti valori di k e q.

Molti sensori hanno un segnale in uscita di tipo elettrico ed integrano al loro interno circuiti elettronici che presentano caratteristiche non lineari. Nei sensori integrati, molto spesso, per ridurre l'**errore di linearità** si utilizzano diverse soluzioni di tipo analogico che permettono la linearizzazione delle caratteristica stazionaria. Una tecnica molto semplice consiste nel porre un derivatore in parallelo o un resistore addizionale in serie al sensore o al componente non lineare all'interno di un trasduttore, in modo tale che, a parità di indicazione, circoli nel sensore o nel componente non lineare una corrente inferiore, nel caso di derivatore in parallelo, o superiore, nel caso di resistore in serie, rispetto a quella che circolerebbe in assenza della resistenza. La scelta del derivatore in parallelo è operata quando il componente o il sensore presenta una buona linearità a bassi valori di corrente e la perde con il superamento di una soglia di corrente, condizione detta di saturazione. Si fa in modo che il derivatore assorba una corrente tale che nel campo di misura del sensore questo non raggiunga mai la condizione di saturazione. In genere quando si opera la linearizzazione con derivatore in parallelo i sensori sono schematiz-

zati con un generatore equivalente di corrente. Nel caso si predisponga il sensore addizionale in serie al sensore o al componente non lineare, la tecnica funziona a condizione che il segnale di uscita sia prelevato ai capi del resistore addizionale ed è analoga a quella impiegata per la linearizzazione della caratteristica di un diodo, come mostrato nella Fig. 3.2. La scelta del resistore addizionale in serie si opera quando, come nel caso del diodo, la non linearità del sensore o del componente è relativa al primo tratto della caratteristica, per cui si fa in modo che la prima indicazione del sensore si abbia quando la corrente che in esso circola supera il valore da cui inizia la caratteristica lineare. In genere quando si opera la linearizzazione con resistore addizionale in serie i sensori sono schematizzati con un generatore equivalente di tensione.

In Fig 3.2 è mostrato come l'inserimento del resistore di resistenza R_{S1} migliora la linearità del diodo. Durante la semionda positiva il diodo D_1 non conduce e l'amperometro A, di resistenza interna R_m, sarà attraversato da una corrente caratterizzata solo dalle semionde positive, per effetto dell'azione raddrizzatrice del diodo D_2. Durante la semionda negativa il diodo D_1 conduce, in modo che ai capi del circuito a valle sia applicata una tensione trascurabile. Come risultato si ha che si riduce considerevolmente l'effetto della corrente inversa e inoltre non vi è possibilità di scarica del diodo D_2. Lo scopo del resistore addizionale R_{S1} in serie al diodo è quello di far sì che durante la semionda positiva circoli nel diodo D_2 una corrente superiore rispetto a quella misurata dall'amperometro. In tal modo il diodo D_2 potrà operare in zona lineare della sua caratteristica, anche in corrispondenza di bassi valori di tensione e quindi di corrente.

È bene evidenziare che la presenza del derivatore in parallelo o del resistore addizionale in serie degrada sia la risoluzione sia la sensibilità del sensore in quanto aumenterà la variazione del misurando che dia luogo a una variazione percettibile della corrispondente indicazione del sensore ed inoltre per avere la stessa variazione dell'indicazione del sensore, che si aveva prima dell'inserimento del resistore, occorrerà una maggiore variazione del valore della grandezza misurata. La resistenza del derivatore in parallelo o del resistore addizionale in serie deve essere scelta in modo da rendere piccolo l'errore di linearità rispetto all'incertezza strumentale del sensore senza che ciò comporti un degrado eccessivo della risoluzione e della sensibilità.

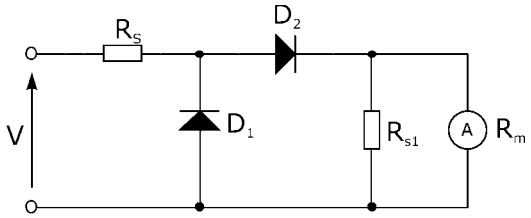

Figura. 3.2 - Linearizzazione della caratteristica di un diodo raddrizzatore

Non va neanche sottaciuto che la tecnica analogica di linearizzazione esposta è applicabile quando, come nel caso del diodo, la caratteristica *y=f(x)* presenta una concavità verso il basso. Nel caso la concavità fosse verso l'alto infatti occorrerebbe una resistenza negativa, che richiede il ricorso a circuiti elettronici più complessi di quelli rappresentati da un semplice resistore. Un altro sistema di linearizzazione della caratteristica con tecniche analogiche è quello di ricorrere a sistemi con controreazione negativa, infatti è noto che una controreazione negativa consente di limitare le distorsioni e di linearizzare la risposta. Anche in questo caso si ha una riduzione della sensibilità che è tanto più accentuata quanto maggiore è il fattore di reazione.

Molto spesso si impiegano blocchi analogici con caratteristica inversa a quella del sensore. Per esempio sono ampiamente impiegati amplificatori logaritmici con caratteristiche esponenziali. Un metodo più recente che si è molto diffuso negli *smart sensor* è quello di impiegare un convertitore analogico digitale, ADC, con caratteristica non lineare tale da compensare la non linearità del sensore, in questo modo la conversione e la linearizzazione sono effettuate contemporaneamente utilizzando un'unica unità fisica. Sono stati proposti al riguardo diversi schemi di conversione che in genere si basano sul principio di adattare la conversione alle caratteristiche non lineari del sensore. Un'altra tecnica è quella di realizzare un ADC con una caratteristica che a tratti approssimi la caratteristica inversa del sensore.

Come si è accennato inizialmente le tecniche che si vanno più diffondendo per la linearizzazione della caratteristica stazionaria dei sensori sono quelle di tipo numerico. La più semplice è realizzata col memorizzare in una ROM (*read only memory*) la caratteristica inversa del sensore con associati gli errori di linearità e di indirizzare l'uscita dell'ADC in quella zona di memoria per apportare la correzione. Tecniche più evolute si basano su un approccio adattativo costituito da due fasi. La prima delle quali consiste nell'invertire la caratteristica del sensore e nel suddividerla in diversi tratti, a questo scopo è molto usato lo schema iterativo di *Newton-Raphson*. La seconda fase consiste nella implementazione di un algoritmo iterativo in grado di migliorare con continuità la linearità dei tratti in cui è stata suddivisa la caratteristica inversa del sensore, utilizzando una procedura basata sulla minimizzazione dell'errore di linearità relativo ai diversi tratti. L'algoritmo inoltre aggiorna continuamente la tabella delle correzioni, rendendo trascurabile nei risultati forniti l'errore di linearità.

3.5 - Funzionamento in regime dinamico

Nel seguito di questo capitolo si esamineranno esclusivamente sensori con ingresso e uscita analogici e si assumerà un modello di tipo continuo. Benché spesso sia sufficiente caratterizzare un sensore in termini di comportamento in condizioni di regime permanente, a volte è utile esaminare anche le sue caratteristiche in regime transitorio o dinamico, in alcuni casi indispensabile come quando si esaminino i sensori di vibrazione.

Spesso le caratteristiche dinamiche permettono di comprendere meglio il comportamento del sensore in regime stazionario. Inoltre è possibile definire una funzione di trasferimento, errore dinamico, che caratterizza lo scostamento tra il comportamento effettivo in condizioni transitorie e quello desiderabile. Infatti il ritardo nella risposta del sensore al misurando inserito in ingresso può contribuire all'incertezza della misura. Quando si utilizza un sensore per misure nelle quali si presentano variazioni rapide del misurando o è necessario visualizzare fedelmente la risposta a sue variazioni discontinue, occorre avere informazioni sulle caratteristiche dinamiche del sensore.

Il **limite di velocità** è quel valore limite della velocità di variazione del misurando, oltre il quale l'indicazione del sensore non è in grado di seguire con la stessa velocità le variazioni del misurando. Il **tempo di recupero** è quello necessario al sensore per riprendere a funzionare secondo le caratteristiche specificate, dopo il verificarsi di un determinato evento.

Nello studio del funzionamento del sensore in regime dinamico si utilizza un **modello matematico** semplificato non tenendo conto delle grandezze di influenza e supponendo adeguato un modello a parametri concentrati. Si ipotizza inoltre che il sistema sia

invariante nel tempo (si trascurano le variazioni temporali dei parametri) e quindi risulti a parametri costanti, infine si linearizzano le caratteristiche ingresso-uscita e quindi si rende applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti.

In un sistema di misura a più ingressi i segnali agenti su uno o su diversi di questi prendono il nome di **ingressi forzanti** o **funzioni di eccitazione**. Nel seguito si esamineranno alcune funzioni forzanti tipiche dette anche **segnali canonici**, utilizzate per studiare o provare uno stadio di un sensore. In realtà sia i sensori sia le grandezze fisiche da misurare non sempre sono riconducibili a modelli o funzioni matematiche semplici. È d'altra parte riconosciuta l'utilità di studiare il comportamento di un sensore esaminando la sua risposta a prefissate funzioni canoniche abbastanza semplici. Ciò è di grande interesse per lo studio degli effetti sulla risposta di variazioni parametriche caratteristiche di un sensore o per confrontare il comportamento di due o più sensori, sollecitati dalle stesse funzioni di eccitazione. Le funzioni canoniche che saranno prese in esame sono il gradino, l'impulso, la rampa e la funzione sinusoidale.

Le equazioni differenziali caratterizzanti un sistema la cui variabile d'ingresso sia x e quella di uscita y possono essere poste nella forma generale seguente:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + ... + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_n \frac{d^n x(t)}{dt^n} + ... + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t)$$

dove si ipotizza che il sistema sia invariante nel tempo e quindi che i coefficienti a_i e b_i, siano costanti. La risposta dinamica del sistema, ovvero l'andamento del segnale di uscita nel tempo, in dipendenza di un determinato segnale forzante $x(t)$, può essere ottenuta risolvendo la precedente equazione differenziale o ricorrendo alle funzioni di trasferimento e alle trasformate di *Laplace*, definita in Appendice 5.1, che presentano il notevole vantaggio di trasformare l'equazione differenziale in equazione algebrica.

3.6 - Funzione di trasferimento errore dinamico

Si è accennato che il ritardo tra il segnale presente in uscita e l'istante di applicazione del misurando può comportare delle incertezze nella misura specie in regime dinamico. L'entità dell'errore dinamico è in genere variabile nel tempo.

Si definisce pertanto una funzione temporale $y_E(t)$, **errore dinamico**, che può essere valutata mediante l'introduzione di una funzione di trasferimento errore dinamico del sistema, $G_E(p)$. Prima di definire tale funzione è bene precisare che questo modello è relativo agli errori deterministici e non si applica a quelli aleatori o stocastici, causati ad esempio dalla presenza del rumore. Gli errori accidentali devono quindi essere assenti o trascurabili rispetto a quelli sistematici. Si consideri ora un segnale in ingresso $x(t)$ la cui trasformata di *Laplace* sia $X(p)$. Si indichino con $Y(p)$ e $Y_A(p)$ le trasformate di *Laplace* del segnale di uscita effettivo e atteso, rispettivamente, dove si assume come **segnale di uscita atteso**, ai fini del calcolo dell'errore dinamico, quello privo di ritardo. È allora possibile definire due funzioni di trasferimento del sistema: una $G(p)$ effettiva, e l'altra attesa, $G_A(p)$, date da

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \qquad G_A(p) = \frac{Y_A(p)}{X(p)}$$

La **funzione di trasferimento errore dinamico** si definisce come la differenza tra le due precedenti funzioni di trasferimento:

$$G_E(p) = G(p) - G_A(p)$$

Sulla base di questa definizione è possibile ricavare la trasformata di *Laplace* della funzione errore dinamico $y_E(t)$ in funzione della trasformata di *Laplace* del segnale in ingresso:

$$Y_E(p) = G_E(p)X(p) = \left[G(p) - G_A(p)\right]X(p)$$

3.7 - Sistemi di ordine zero

Per un **sistema di ordine zero** l'equazione caratteristica, in base all'equazione generale è del tipo: $y(t)a_0 = x(t)$, dove si è posto $b_0=1$, in modo che la costante a_0 coincida con la costante di taratura del sensore. In base alla precedente equazione la funzione di trasferimento di un sistema di ordine zero risulta:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{a_0} = k$$

dove la costante k è la sensibilità del sensore. L'esame delle equazioni precedenti permette di affermare che un sistema di ordine zero non altera le caratteristiche temporali di una funzione eccitatrice in ingresso dipendente dal tempo. Quindi tra ingresso e uscita non sono introdotte variazioni di fase, alterazioni di frequenza, variazioni di ampiezza con la frequenza. I sistemi di ordine zero rappresentano pertanto **sensori con comportamento dinamico ideale**. In questo caso la funzione di trasferimento attesa $G_A(p)$ coincide con quella effettiva $G(p)$, per cui la funzione di trasferimento errore dinamico è nulla: $G_E(p)=0$. Se ne deduce che per un sistema di ordine zero anche la funzione temporale errore dinamico $y_E(t)$ risulta nulla. È bene precisare che teoricamente un sistema di ordine zero fornisce una risposta dinamica ideale, ma può dar luogo a un errore sistematico in regime stazionario, a causa della non perfetta coincidenza tra la costante di taratura a_0 effettiva e quella vera.

3.8 - Sistemi del primo ordine

Le considerazioni che seguono assumono notevole interesse poiché sono molti i sensori che possono essere caratterizzati con un sistema del primo ordine. La funzione di trasferimento di un sistema del primo ordine è data da:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{1 + p\tau}$$

dove la costante τ ha dimensioni di un tempo e prende il nome di **costante di tempo** del sensore. Per ottenere la funzione di trasferimento attesa $G_A(p)$, che è quella di un sistema di ordine zero, si può considerare la funzione di risposta armonica in condizioni di frequenza nulla, ottenuta sostituendo nell'equazione precedente a p la quantità $j\omega$ e ponendo $\omega=0$. Operando in tal modo si ha infatti: $G_A(p)= k$. Mentre la costante di tempo τ ha sempre le dimensioni di un tempo, la sensibilità statica ha dimensioni fisiche dipendenti dal sistema considerato e rappresenta l'entità del segnale d'uscita per segnale d'ingresso unitario e costante. Note le funzioni di trasferimento effettiva e attesa è possibile ricavare la funzione di trasferimento errore dinamico per un sistema del primo ordine:

$$G_E(p) = \frac{k}{1 + p\tau} - k = -\frac{kp\tau}{1 + p\tau}$$

Dall'esame di questa equazione si ricava che un sensore assimilabile ad un sistema del primo ordine ha un funzionamento in regime dinamico tanto migliore quanto più è piccola la sua costante di tempo, in quanto al limite per $\tau=0$ si ha che $G_E(p)=0$.

Nel seguito si esaminano le risposte di un sistema del primo ordine ad alcune funzioni canoniche. In Appendice 5.2 si dimostra matematicamente che la risposta ad un gradino di un sensore assimilabile ad un sistema del primo ordine è quella mostrata in Fig. 3.3. Una condizione del genere si verifica quando il sensore è collegato ad un sistema già funzionante con valore del misurando pari ad A, o quando il misurando ha una brusca variazione sempre di entità pari ad A. In Fig. 3.3 sono riportate le funzioni di risposta al gradino dell'indicazione $y(t)$ del sensore e dell'errore dinamico $y_E(t)$ con la normalizzazione delle ordinate ad 1 e con la scala del tempo in valori relativi alla costante di tempo τ, pari al tempo necessario al sensore perché la sua risposta raggiunga il *63%* del valore di regime. Come è facilmente intuibile dall'esame della figura nel caso la costante di tempo fosse nulla, l'indicazione del sensore seguirebbe senza ritardo l'evoluzione del misurando e l'errore dinamico risulterebbe nullo. Quindi il comportamento dinamico di un sensore sollecitato da un ingresso a gradino è tanto migliore quanto più τ è piccolo. Si definisce anche **tempo di salita** quello necessario al sensore perché la sua risposta si porti dal *10%* al *90%* del valore di regime. Il VIM definisce **tempo di risposta al gradino** (*step response time*) la durata tra l'istante in cui il valore della grandezza in ingresso al sensore subisce una brusca variazione tra due specificati valori costanti della grandezza e l'istante in cui la corrispondente indicazione del sensore si stabilisce tra limiti specificati intorno al suo valore finale di regime stazionario. Un altro parametro dinamico indicato nei fogli di accompagnamento del sensore, simile al tempo di risposta al gradino, è il **tempo di assestamento** (*settling time*), definito come il tempo necessario al sistema per raggiungere e stabilizzarsi entro una certa fascia di incertezza, intorno al valore di regime. Un piccolo tempo di assestamento è quindi indicativo di una risposta veloce. Ovviamente il tempo di assestamento dipende dalla fascia di incertezza stabilita. La Fig. 3.3 consente di stabilire che si hanno tempi di assestamento pari a τ, 2τ, 3τ e 4τ per fasce d'incertezza rispettivamente del *36,8%*, *13,5%*, *5%*, *1,8%*. Ovviamente al ridursi della fascia d'incertezza aumenta il tempo d'assestamento.

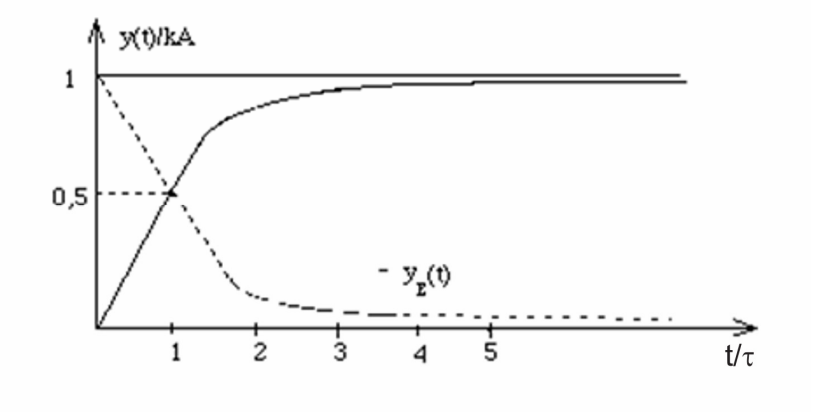

Figura 3.3 - Risposta a una funzione a gradino di un sistema del primo ordine

In Appendice 5.3 si dimostra matematicamente che la risposta *y(t)* ad un impulso di durata finita *T* e di ampiezza pari a *A/T* di un sensore assimilabile ad un sistema del primo ordine è quella mostrata in Fig. 3.4. Un aspetto interessante della funzione impulsiva è la sua relazione con quella gradino. Se una funzione gradino è inviata in ingresso a un dispositivo differenziale, l'uscita sarà una funzione di tipo impulsivo. Si può quindi affermare che la funzione impulsiva può essere ottenuta teoricamente come la derivata di una funzione gradino, anche se la derivata in corrispondenza della discontinuità del gradino non può essere rigorosamente applicata.

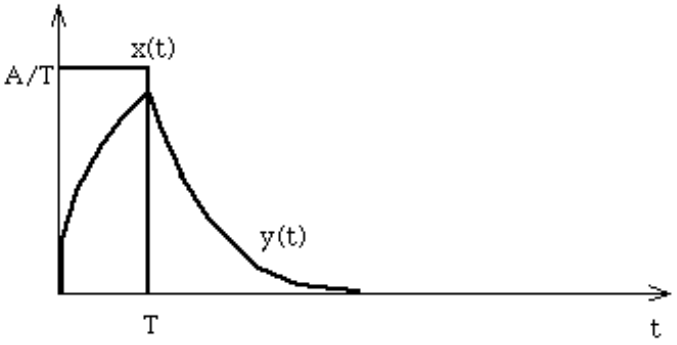

Figura 3.4 - Risposta di un sensore del primo ordine a un impulso di durata finita

Un impulso di durata finita può essere assimilato a una brusca variazione del misurando. Il sensore riuscirà a seguire l'evoluzione del misurando tanto meglio quanto più piccola è τ. In tal caso, in particolare, il valor massimo dell'indicazione si avvicinerà a quello dell'impulso. Questa, in realtà, si potrebbe rivelare una situazione pericolosa, in quanto c'è la possibilità che si ecceda la **condizione operativa limite** del sensore. Nel caso l'indicazione del sensore sia costituita da una tensione elettrica, allo scopo di limitare il valore della tensione da applicare al sistema di condizionamento del segnale, questo è preceduto da due diodi, in genere *zener*, in controfase.

Nella figura 3.5 sono indicate due tipiche applicazioni dei diodi *zener*, lo schema nella parte *b* della figura riporta la tecnica impiegata per limitare i valori della tensione sul sistema di condizionamento, rappresentato con la sua impedenza d'ingresso Z_c.

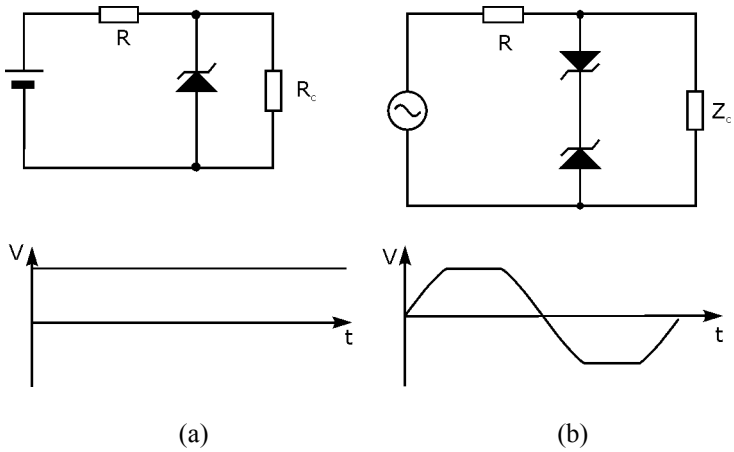

Figura 3.5 - Alcune applicazioni dei diodi zener

Nella Fig. 3.5(a) il diodo *zener* consente di rendere ininfluenti le variazioni di tensione della sorgente di alimentazione E e, quindi, ideale la batteria stessa con tensione costante pari alla sua tensione di scarica (*breakdown*) V_B. È evidente che la tensione E e la resistenza R devono essere progettate in modo tale che il diodo operi nella zona di scarica. Questo circuito è molto utilizzato negli *smart sensor* per fornire un riferimento stabile di tensione. La Fig. 3.5(b) mostra come sia possibile "squadrare" un'onda sinusoidale che presenti valori di picco eccedenti la tensione di scarica di due *diodi zener* uguali tra loro e in serie. Ponendo i due diodi in ingresso al sistema di condizionamento del segnale del sensore, si è certi che la massima tensione che sarà ad esso applicata non ecceda il valore di V_B. A volte i due diodi sono posti in parallelo invece che in serie, senza che ciò vari il funzionamento precedentemente esposto.

In Appendice 5.4 si dimostra matematicamente che la risposta $y(t)$ ad una rampa di pendenza pari ad R di un sensore assimilabile ad un sistema del primo ordine è quella mostrata in Fig. 3.6. In figura sono riportate le funzioni attesa $y_A(t)$ ed effettiva $y(t)$ della risposta alla rampa, in modo da evidenziare sia l'errore transitorio, caratteristico della prima fase della risposta $y(t)$, sia l'errore stazionario, pari a $kR\tau$ dovuto al ritardo temporale nella risposta del sensore. L'errore stazionario aumenta con l'aumentare sia della costante di tempo τ sia con la pendenza R della rampa. Anche lo scostamento nel tratto iniziale della $y(t)$, che porta in conto l'errore transitorio, si esaurisce tanto più rapidamente quanto più τ è piccola. Poiché è in genere molto più facilmente realizzabile una variazione del misurando che segua l'andamento di una funzione a rampa piuttosto che di un gradino o di un impulso, la costante di tempo τ, generalmente si determina dalla misura dell'errore stazionario conseguente all'applicazione di una rampa. Infatti noti con precisione la sensibilità k del sensore e la pendenza R della rampa, dalla misura dell'errore $kR\tau$, si ricava facilmente τ.

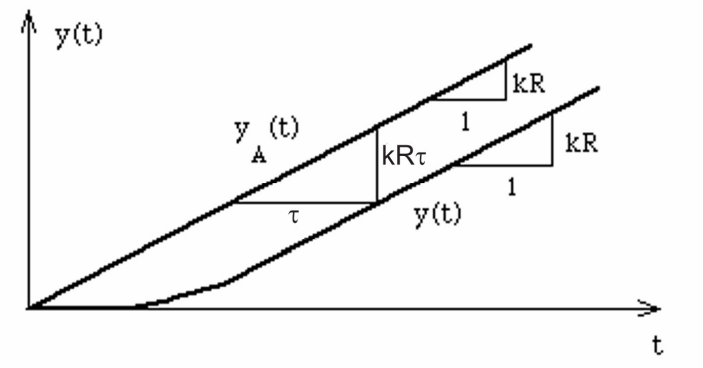

Figura 3.6 - Risposta di un sistema del primo ordine a una funzione a rampa

È bene precisare l'importanza della misura accurata del ritardo nella risposta del sensore per la corretta progettazione di un sistema di controllo. Molto spesso, a tale scopo, è anche accettabile che τ non sia troppo piccolo, purché il suo valore sia noto con precisione e non vari nel tempo, ovvero sia stabile.

Se si applica in ingresso al sensore un misurando che ha l'andamento di un segnale sinusoidale di ampiezza costante pari ad A e si varia la sua frequenza, un sensore ideale fornirà un'indicazione con lo stesso andamento, ovvero tale indicazione sarà costituita da un segnale ancora sinusoidale, di ampiezza costante pari a kA e di frequenza uguale a quella del corrispondente misurando. In realtà se vi è un ritardo dell'indicazione del sensore rispetto all'applicazione del misurando, poiché ad un ritardo nel dominio del tempo corrisponde uno sfasamento nel dominio delle frequenze, le due onde sinusoidali che rappresentano ingresso ed uscita saranno sfasate di un angolo ϕ. La rappresentazione dell'andamento del modulo della risposta G del sensore normalizzata ad 1 e del suo argomento o fase ϕ è fatta in genere in funzione di $\omega\tau$, dove ω è la pulsazione del misurando, che non è altro che la frequenza moltiplicata per 2π. Così operando si ottengono i diagrammi della risposta in frequenza del sensore chiamati rispettivamente **risposta in ampiezza** e **risposta in fase**. In Appendice 5.5 si dimostra matematicamente che gli andamenti della risposta in frequenza in ampiezza e fase di un sensore assimilabile ad un sistema del primo ordine sono quelli mostrati in Fig. 3.7. Dall'esame della figura si evince che il sensore si avvicina al comportamento ideale precedentemente indicato quanto più il prodotto $\omega\tau$ è minore di 1 ($\omega\tau<<1$). Infatti, in queste condizioni il modulo della risposta coincide con kA e il ritardo di fase introdotto dal sensore è nullo ($\phi = 0$). La condizione $\omega\tau<<1$ equivale a dire che il funzionamento dinamico ideale del sensore è relativo a segnali ad esso applicati che abbiano una frequenza molto più piccola della cosiddetta frequenza di taglio normalizzata $f_t = 1/2\pi\tau$. Se allora la costante di tempo del sensore è molto piccola, la frequenza di taglio normalizzata tende all'infinito e il comportamento dinamico ideale del sensore si estende a tutte le frequenze. In condizioni opposte, quando la costante di tempo e quindi la frequenza di taglio normalizzata hanno un valore finito e il prodotto $\omega\tau$ è molto maggiore di 1 ($\omega\tau>>1$) si ha una forte attenuazione del modulo della risposta in ampiezza e uno sfasamento di 90°. Il sensore cioè si comporta come un filtro passa basso che attenua tutte le componenti armoniche presenti nel misurando che siano molto maggiori della frequenza di taglio normalizzata $f_t = 1/2\pi\tau$. Quindi si può sintetizzare che per sensori con piccola costante di tempo e mi-

surandi con frequenza molto minore dell'inverso di tale costante l'errore dinamico di misura risulta piccolo. È anche possibile, noti τ e la frequenza del misurando, apportare la correzione di ampiezza e fase sul segnale in uscita in condizioni di regime stazionario. Se il segnale di ingresso è costituito da una combinazione di più sinusoidi di differente frequenza, la correzione diventa più complessa, per cui lì dove possibile occorre operare in modo che la costante di tempo del sistema risulti molto più piccola dell'inverso della frequenza relativa alla componente armonica a frequenza più elevata, contenuta nel misurando.

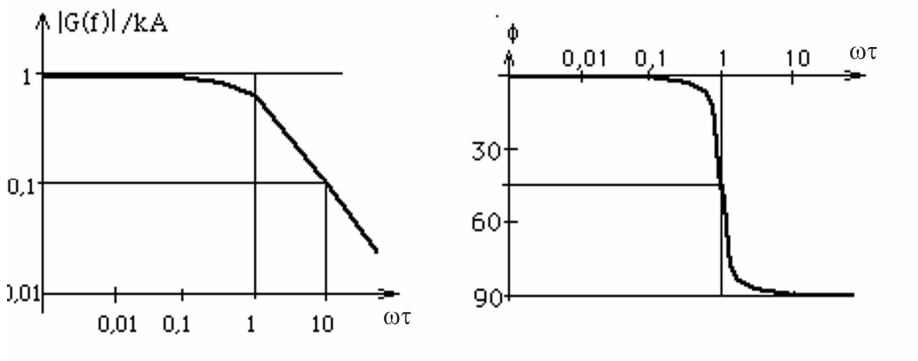

Figura 3.7 - Risposta in frequenza di un sistema del primo ordine

La **risposta in frequenza** è una delle caratteristiche più importanti per la caratterizzazione dinamica di un sensore. Come si è detto le curve che il costruttore fornisce riportano, in funzione del campo di frequenza utile, l'andamento del modulo e dell'argomento o fase della funzione di risposta armonica. Spesso le ordinate sono in scala logaritmica. Il campo di frequenza utile è quello in cui non si ha distorsione, ovvero il modulo della curva di risposta armonica non esce da una fascia di incertezza prefissata, la cui ampiezza dipende dal grado di distorsione ammesso. In presenza di un ingresso sinusoidale, ogni deviazione dell'indicazione del sensore dalla legge sinusoidale può essere assunta come un efficace indice della non linearità del sensore. A volte, se si dispone di un misurando variabile con legge sinusoidale, questo si applica all'ingresso del sensore e si osserva il contenuto di armoniche presente all'uscita, indice della non linearità del sensore. Il metodo non è facilmente applicabile, in quanto richiede la purezza della sinusoidalità del misurando, ovvero questo non dovrebbe contenere componenti armoniche oltre la fondamentale.

3.9 - Sistemi del secondo ordine

Molti sensori che hanno parti mobili come alcuni tra quelli di vibrazione, detti sismografi ed accelerometri, sono assimilabili a sistemi del secondo ordine. La funzione di trasferimento di un sistema del secondo ordine è data dalla seguente espressione:

$$G(p) = \frac{k}{(1 + pt_1)(1 + pt_2)}$$

dove t_1 e t_2 rappresentano le due **costanti di tempo** del sistema. Tale funzione di trasferimento è quella effettiva, mentre quella attesa, relativa ad un sistema di ordine zero, è pari a $G(p)=k$. Dalla differenza tra queste due funzioni è possibile ricavare la funzione di trasferimento errore dinamico per un sistema del secondo ordine:

$$G_E(p) = -kp(t_1 + t_2)\frac{1 + p\dfrac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}}{(1 + t_1)(1 + t_2)}$$

Dall'esame della quale si evince che un sensore assimilabile ad un sistema del secondo ordine ha un comportamento dinamico tanto migliore quanto più piccole sono le sue due costanti di tempo. In genere, per studiare la risposta di un sistema del secondo ordine, si preferisce al posto delle due costanti di tempo introdurre altri due parametri: la **pulsazione caratteristica** o **naturale** ω_n e il **fattore di smorzamento** ζ. La funzione di trasferimento assume la nuova forma:

$$G(p) = \frac{k}{1 + 2\zeta\dfrac{p}{\omega_n} + \dfrac{p^2}{\omega_n^2}}$$

In Appendice 5.6 si dimostra matematicamente che la risposta ad un gradino di un sensore assimilabile ad un sistema del secondo ordine è quella mostrata in Fig. 3.8. Come già evidenziato in precedenza, una condizione del genere si verifica quando il sensore è collegato ad un sistema già funzionante con valore del misurando pari ad A, o quando il misurando subisce un incremento brusco che ne fa aumentare il valore sempre di una quantità pari ad A.

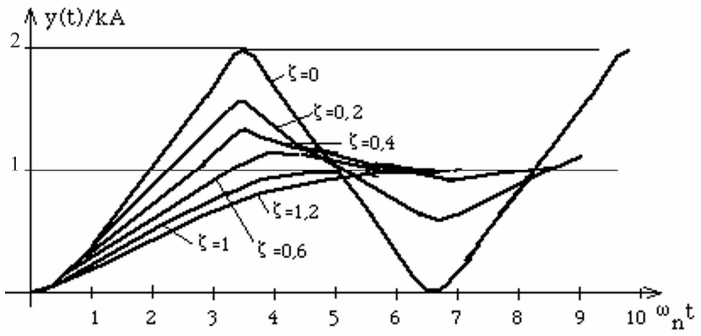

Figura 3.8 - Risposta a una funzione a gradino di un sistema del secondo ordine

In Fig. 3.8 sono riportate le funzioni di risposta al gradino dell'indicazione $y(t)$ del sensore con la normalizzazione delle ordinate ad 1, per diversi valori del fattore di smorzamento ζ che è la quantità determinante sul tipo di risposta del sistema. Come si vede dalla figura l'indicazione del sensore può oltrepassare il valore di regime e la sua sovraelongazione può essere il doppio di questo valore. All'aumentare di ζ si riducono

le oscillazioni intorno alle condizioni di regime. Per ζ<1 il sistema è sottosmorzato. Per ζ=1 lo smorzamento è critico. Per ζ>1 si ha un sovrasmorzamento. Un sistema del secondo ordine con smorzamento nullo, quando è sollecitato da una funzione a gradino agisce come un generatore di segnale sinusoidale. Le perdite devono essere effettivamente nulle o compensate dal sistema di alimentazione perché si possa effettivamente avere un generatore sinusoidale. Una delle migliori indicazioni sulla velocità di risposta del sistema è dato dal **tempo di assestamento**.

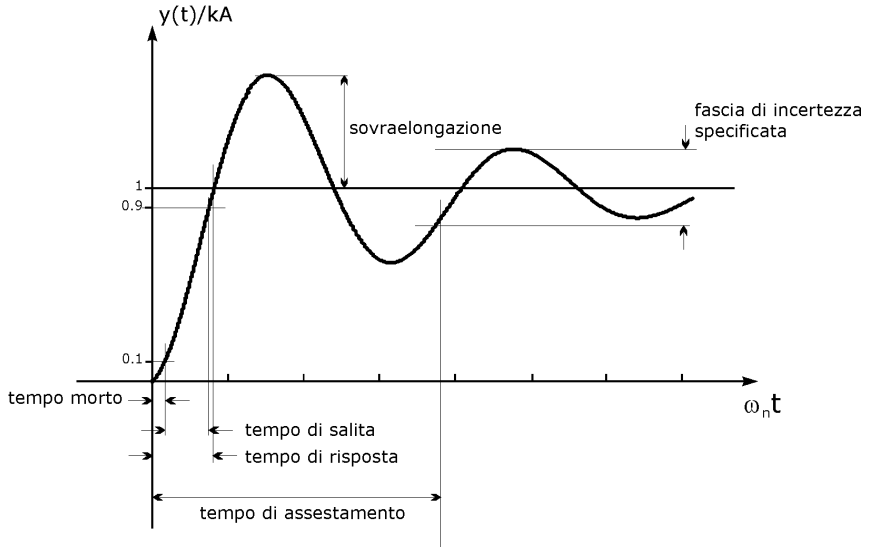

Figura 3.9 - Definizione di alcuni parametri per la risposta al gradino

Naturalmente il valore ottimo di ζ varierà con la scelta della fascia di incertezza. Quando questa è del 5%, un valore di ζ compreso tra 0,7 e 0,8 dà luogo al tempo di assestamento più breve. In realtà il miglior valore di ζ può variare in dipendenza della forma del gradino, che influenza la risposta del sistema e quindi il tempo di assestamento. Molti sensori del secondo ordine disponibili in commercio utilizzano un valore di ζ compreso tra 0,6 e 0,7, in quanto ciò consente di avere anche una buona risposta in frequenza in un'ampia banda. È bene ricordare che quanto minore è il tempo di assestamento tanto più rapidamente la funzione errore dinamico si porta a zero.

Altri parametri caratterizzanti la risposta al gradino di un sistema del secondo ordine sono riportati nella Fig. 3.9. In particolare si evidenziano la sopraelongazione rispetto alla condizione di regime, il tempo di salita, il tempo di risposta e il tempo di assestamento, che richiede la specificazione di un determinata fascia d'incertezza. A volte il tempo necessario al sensore per raggiungere il 10 % del valore di regime è detto tempo morto, da non confondere con la banda morta e con i sistemi a tempo morto che saranno esaminati in seguito.

In Appendice 5.7 si dimostra matematicamente che la risposta *y(t)* ad un impulso di durata finita *T* e di ampiezza pari a *A/T* di un sensore assimilabile ad un sistema del secondo ordine è quella mostrata in Fig. 3.10. La risposta è sempre normalizzata ed è ri-

portata per tre valori di ζ. Anche in questo caso per ζ=1 si ha lo smorzamento critico, per ζ< 1 il sistema è sottosmorzato o oscillatorio, per ζ>1 il sistema è sovrasmorzato o non oscillatorio. Dalla Fig. 3.10 si nota che per ζ=0,65 si ottiene il minor tempo di assestamento, che consente al sensore di portarsi rapidamente in condizioni di funzionamento normale dopo che l'impulso si è esaurito.

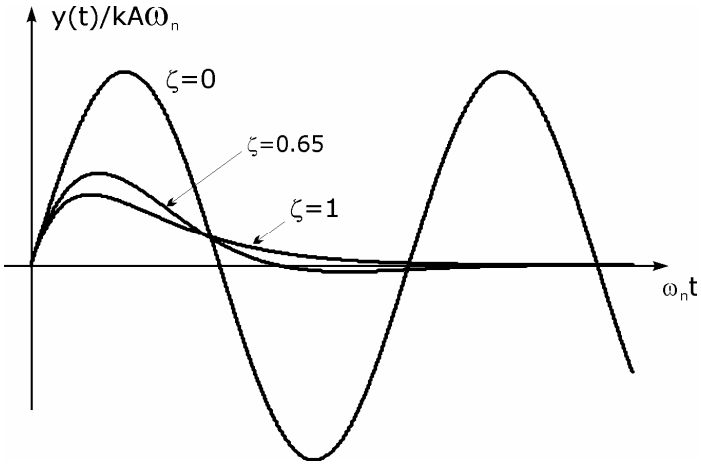

Figura 3.10 - Risposta a una funzione impulsiva di un sistema del secondo ordine

In Appendice 5.8 si dimostra matematicamente che la risposta *y(t)* ad una rampa di pendenza pari ad *R* di un sensore assimilabile ad un sistema del secondo ordine è quella mostrata in Fig. 3.11. In figura sono riportate le funzioni attesa $y_A(t)$ ed effettiva *y(t)* della risposta alla rampa, in modo da evidenziare sia l'errore transitorio, caratteristico della prima fase della risposta *y(t)*, sia l'errore stazionario, pari a $2kR\zeta/\omega_n$ dovuto al ritardo temporale nella risposta del sensore. L'errore stazionario aumenta con l'aumentare sia del fattore di smorzamento ζ, sia con la pendenza R della rampa. È evidente dalla fig. 3.11 che l'errore è la somma di due termini: uno transitorio e uno stazionario, come nel caso della risposta ad una rampa in un sistema del primo ordine. L'errore stazionario è dovuto al ritardo t_1+t_2 con cui il sistema segue l'ingresso dopo la fase transitoria. Per ridurre questo errore, occorrerebbe, a parità di ω_n, ridurre ζ, solo che al solito tale riduzione potrebbe comportare larghe oscillazioni del sistema. Anche in questo caso è necessario cercare un compromesso e valori ottimali di ζ sono ancora quelli compresi tra 0,6 e 0,7.

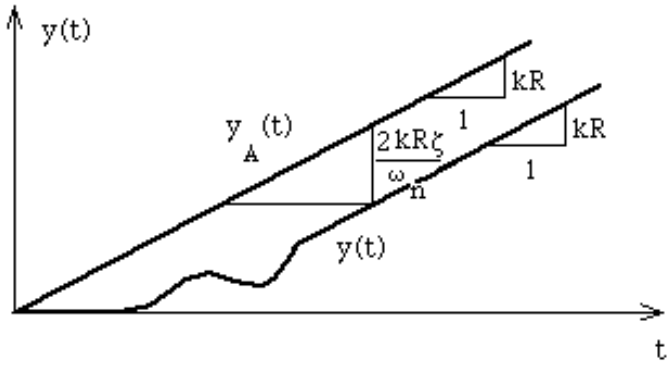

Figura 3.11 - Risposta a una funzione a rampa di un sistema del secondo ordine

In Appendice 5.9 si dimostra matematicamente che gli andamenti della risposta in frequenza in ampiezza e fase di un sensore assimilabile ad un sistema del secondo ordine sono quelli mostrati in Fig. 3.12. Dagli andamenti di queste due funzioni si evince che l'uscita di un sensore del secondo ordine interessato da un misurando di tipo sinusoidale sarà ancora un segnale sinusoidale con la stessa frequenza, ma con ampiezza e fase variabili con ω e con ζ.

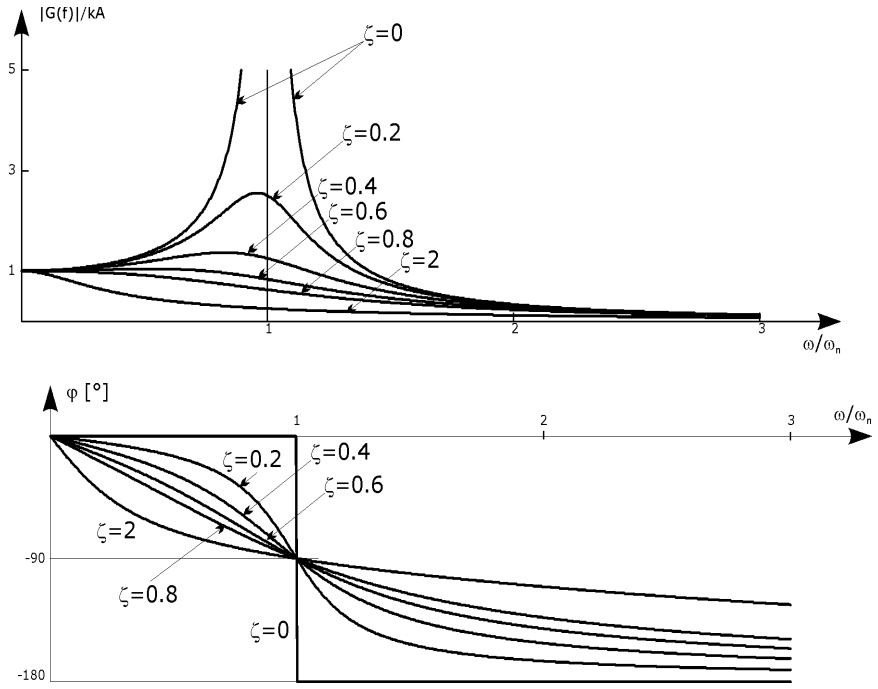

Figura 3.12 - Risposta in frequenza di un sistema del secondo ordine

Al limite per ζ=0 e $\omega=\omega_n$ l'ampiezza cresce ad un valore teoricamente infinito. Dalla figura emerge anche che, per una registrazione fedele dei misurandi in un'ampia banda di frequenza, occorre scegliere valori di ζ compresi tra 0,6 e 0,7. Per tali valori il modulo della risposta in frequenza è abbastanza piatto al variare della pulsazione e quindi della frequenza. La fase ϕ varia linearmente con la frequenza il che comporta semplicemente la presenza di un ritardo nella risposta, uguale per tutte le componenti del misurando. L'eliminazione di questo ritardo richiederebbe valori di ζ molto piccoli, cui corrispondono ampiezze variabili con la frequenza. Se l'interesse principale è quello di misurare il segnale in ingresso con la minima incertezza, accettando un ritardo temporale, la fase deve variare linearmente con la frequenza, come avviene appunto per valori di ζ compresi tra 0,6 e 0,7. Tali valori sono ad esempio ottimi per quei sensori utilizzati in sistemi di registrazione ad ampia banda di frequenza. Se invece si desiderano caratteristiche selettive si preferirà un valore di ζ quanto più piccolo possibile e si farà coincidere la frequenza da esaltare con quella naturale del sistema.

Alcuni componenti utilizzati nei sistemi di misura consentono di avere segnali in uscita della stessa forma dell'ingresso ma con un ritardo temporale t_m (tempo morto o *dead-time*). Matematicamente si ha:

$$y(t) = kx(t - t_m)$$

Questi componenti prendono anche il nome di **ritardatori puri** e per essi è facile determinare le risposte ai segnali canonici, esaminati precedentemente.

In Fig. 3.13 sono riportate tali risposte confrontate con quelle attese, per cui è facile risalire alla funzione errore dinamico. È interessante osservare che la risposta in frequenza di un sistema a tempo morto è quella ideale di un sistema del secondo ordine da utilizzare, per esempio, in un registratore con ampia banda di frequenza.

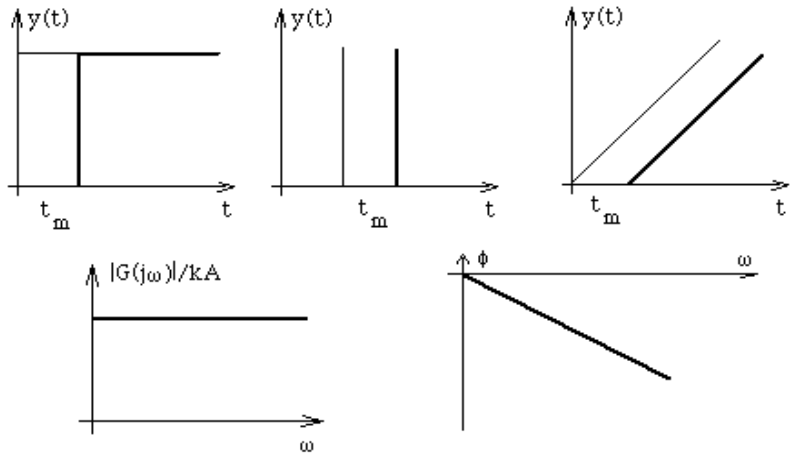

Figura 3.13 - Risposte di sistemi a tempo morto: a) al gradino; b) all'impulso; c) alla rampa; d) in frequenza

3.10 - Le caratteristiche di qualità

Molto spesso gli utilizzatori di sensori sono interessati alla loro qualità a lungo termine. I sensori impiegati nell'industria, nel commercio, in agricoltura, nei servizi, con particolare riguardo a quelli in campo medico, nei laboratori di ricerca devono essere in grado di **soddisfare** pienamente le esigenze del **cliente**. La globalizzazione dell'economia, il crescente interesse al commercio elettronico hanno determinato una maggiore offerta di sensori con conseguente aumento della competizione su tutti i mercati. I clienti diventano sempre più esigenti e consapevoli della necessità di svolgere con competenza le proprie scelte. Essi valutano, con cognizione di causa, la qualità del prodotto offerto e quindi sono in grado di conoscere quali informazioni pretendere dai fornitori, in particolare le prestazioni qualificanti ed i relativi livelli.

La competizione impone ai produttori di sensori la realizzazione di sistemi organizzativi sempre più efficaci ed efficienti, che consentano il miglioramento continuo della qualità, mirata alla soddisfazione dei clienti. L'ottimizzazione dell'**organizzazione** deve coinvolgere tutte le fasi dei processi di *marketing*, progettazione, produzione e commercializzazione, anche se si tende sempre più a concentrare nella parola ***marketing*** tutte le fasi di ingegnerizzazione e commercializzazione del prodotto, comprensive di quella del controllo della qualità.

I requisiti richiesti dal cliente sono definiti nelle **specifiche**. Le specifiche devono essere chiaramente quantificate, sistematicamente verificate e validate, attraverso opportune misure, e continuamente controllate. È proprio nella fase di validazione che il metrologo gioca un ruolo fondamentale all'interno del controllo della qualità. Molti paesi richiedono la certificazione di qualità perché un prodotto possa essere commercializzato al loro interno. Per esempio, la **marcatura CE** è una sigla che deve essere apposta in modo visibile e indelebile su un prodotto per attestare che esso possiede i requisiti essenziali fissati da una o più direttive comunitarie. La marcatura CE attesta la **conformità** ai requisiti prescritti dalle direttive. Le specifiche rappresentano una variabile da aggiornare in modo continuo sulla base di indagini di mercato. Per il sistematico aggiornamento delle specifiche e, contestualmente, del prodotto realizzato l'organizzazione si deve dotare di un sistema di gestione adeguato a fornire e sostenere il prodotto stesso e quindi a fronteggiare, anche nel corso della fornitura, la richiesta di variazioni.

In modo sintetico ed efficace si può affermare che la qualità di un sensore è la sua **adeguatezza all'uso**. Poiché l'uso che si può fare di un sensore è vastissimo, non si deve confondere qualità con eccellenza, si restringerebbe in tal modo inesorabilmente il mercato, che invece dovrebbe allargarsi quanto più possibile sempre nel rispetto delle diversità, delle attese, delle esigenze e dei gusti dei clienti, anche in base alle loro capacità di spesa. Convenzionalmente si parla di un sistema qualità costituito da un certo numero di elementi, attuato mediante **processi** che si svolgono sia all'interno delle singole funzioni sia attraverso le stesse. Perché un sistema qualità sia efficace questi processi (e le relative responsabilità, le procedure e risorse) dovrebbero essere definiti e distribuiti in modo coerente. Un sistema è la somma e l'interazione di più processi. Perché un sistema sia efficace sono indispensabili coordinamento e compatibilità delle diverse fasi che lo compongono e la definizione delle loro interfacce. La prima fase è quella di **ricerca di mercato**, che può essere commissionata all'esterno a ditte specializzate, le quali abbiano mostrato particolare esperienza nel settore d'interesse. Questa prima indagine serve a stabilire le attese e i bisogni dei clienti, la loro ubicazione geografica e soprattutto i pesi percentuali delle attese, che consentiranno non solo di definire le specifiche, ma anche di attribuire a queste, attraverso alcuni coefficienti, una maggiore o

minore importanza. In tal modo si potranno programmare le attività dei vari processi, tese al rispetto delle specifiche nel loro ordine di priorità. Questa prima fase è senza dubbio la più delicata, in quanto prevede la programmazione del *marketing*, che come si diceva inizialmente comprende non solo le politiche di penetrazione nei mercati, ma anche quelle di controllo della qualità e di verifica della soddisfazione dei clienti.

La seconda fase è quella che prelude all'ingegnerizzazione dei prodotti o dei servizi attraverso la **progettazione** e lo sviluppo. Esiste una tecnica di progetto particolarmente efficiente, quella del ***concurrent engineering***, che permette di ridurre drasticamente i tempi di sviluppo e i costi connessi. Essa è sorta anche per consentire maggiore flessibilità alla progettazione e alla produzione, oltre che per migliorare la qualità dei prodotti. Si basa su tre fasi distinte, così esemplificabili: modello complesso; progetto orientato all'assemblaggio; gestione dei dati aziendali. Per quanto attiene al **modello complesso**, si ha che diversi gruppi di lavoro con competenze in campi differenti collaborano tra loro in un approccio interdisciplinare alla soluzione del problema. Nel campo specifico dell'organizzazione del lavoro in fabbrica le competenze richieste sono molteplici e si affiancano a quelle tipiche di natura tecnico-scientifica alcune di tipo socio-economico quali per esempio: gestione aziendale; *marketing*; sociologia; psicologia sperimentale e applicata; scienza del comportamento; dinamica di gruppo. Il **modello dell'organizzazione** aziendale entra a far parte del modello complessivo della produzione consentendo di ottimizzare le risorse e l'efficienza del sistema globale di fabbrica. Il sistema se efficiente permette di superare la iper-specializzazione e di enfatizzare le capacità del gruppo di gestire situazioni complesse. Il sistema se ben progettato è in grado non solo di dare risposte corrette, ma di essere un ottimo agente della trasformazione del prodotto e del suo adeguamento alle esigenze del cliente. Il modello complesso ha permesso di superare la tecnica seriale, in quanto si ha la contemporanea azione degli esperti sul modello in modo parallelo. La comunicazione tra i diversi gruppi di lavoro, che operano allo stesso progetto, è favorita dalla tecnica di Definizione Elettronica del Prodotto [*Electronic Product Definition* (*EDP*)], un pacchetto di moduli software, in grado di rendere visibile ai gruppi di specialisti un albero di componenti. Le connessioni che legano tra loro le diverse parti dell'intero obiettivo assemblato sono facilmente accessibili. Ogni progettista può operare sulla propria parte considerando i vincoli posti dagli altri progettisti e dalle altre fasi del ciclo di produzione. Essi sono in grado di simulare tutte le fasi di produzione, inserendo i dati relativi alla loro parte di programma in modo da avere un'idea del prodotto finito derivante dalle variazioni progettuali da loro introdotte. Se si tiene conto che i costi di progettazione coprono più del 50% del bilancio complessivo della produzione di un oggetto, è evidente il beneficio derivante al ciclo completo dall'ottimizzazione della progettazione. La nuova tecnica messa a punto consente di: ridurre i costi di progettazione; ottimizzare i tempi di produzione; seguire le fluttuazioni del mercato. Il **sistema di gestione dell'informazione** è strategico. Ad esso hanno accesso in tempo reale tutte le persone autorizzate, seguendo una logica di estensione del sistema aziendale. I dati disponibili riguardano ogni variazione e sviluppo della progettazione e realizzazione dei prodotti. Le informazioni disponibili in rete possono al limite vedere coinvolti anche i clienti, in genere una particolare categoria di clienti privilegiati. Il sistema può essere reso interattivo, in modo da recepire indicazioni, suggerimenti, critiche provenienti da quanti direttamente impiegano il prodotto e potenzialmente possono essere interessati a suoi aggiornamenti, a modifiche, in base a loro esigenze specifiche o implicite, attraverso un rapporto continuativo con il cliente. In ambito aziendale è divenuta fondamentale l'**ergonomia gestionale** d'impresa, che vede il lavoratore non più come un fattore condizionante la produttività, ma come portatore di conoscenze e di ef-

ficienza quando se ne assecondino i bisogni e se ne riconoscano i limiti lavorativi nel tempo. È noto l'apporto che i lavoratori sono stati in grado di fornire in molte nostre aziende al miglioramento della qualità dei prodotti. I più capaci in questo processo si sono rivelati i lavoratori con maggiore esperienza e con maggiore integrazione nella filosofia di sviluppo aziendale, in quanto soddisfatti del loro lavoro. La competitività sul mercato globale richiede che siano sfruttate tutte le potenzialità umane presenti in azienda, abituandole all'interdisciplinarità. Nell'ambito della fase di progettazione è fondamentale la sua **validazione**, per assicurarsi che il prodotto soddisfi definite esigenze e requisiti dell'utilizzatore; è importante che la validazione sia eseguita su un prototipo del prodotto finale (o in una fase intermedia di sviluppo) dopo una positiva verifica della progettazione, in condizioni operative definite. Si richiede anche che tutte le varianti o modifiche siano documentate.

Terminata la fase di progettazione si passa alla **pianificazione** e allo sviluppo dei processi. Il concetto di pianificazione della qualità risponde alle necessità di innovazione e di dinamica produttiva delle imprese inserendo il sistema qualità nel quadro organizzativo e gestionale costituito dalla compagine aziendale. A questo scopo è compito della organizzazione predisporre, documentare e mantenere attivo un **sistema di gestione per la qualità** inteso come strumento perché il prodotto sia **conforme** a requisiti specificati, assicuri la **soddisfazione del cliente** ed il suo miglioramento continuo. La organizzazione deve predisporre un **manuale della qualità** che contenga o richiami le procedure del sistema qualità e delinei la struttura della documentazione relativa al sistema stesso.

Particolare rilevanza assume poi la **produzione** del prodotto. Subito dopo la seconda guerra mondiale si ebbe l'introduzione di macchine di elevata complessità e sorse la necessità di incrementare l'automazione prima delle macchine e poi dei processi produttivi, assegnando all'uomo semplicemente compiti di controllo e coordinamento. L'automazione dei processi produttivi è stata favorita dall'avvento di sistemi assistiti da calcolatore e dagli sviluppi della robotica. La possibilità di corredare la macchina con sensori in grado di trasmettere le informazioni a distanza ha dato la possibilità di rilevare situazioni anomale ed anche di avere indicazioni in tempi rapidi sia di situazioni pericolose per le persone sia di parti di macchine in avaria. In sistemi intelligenti, assistiti da calcolatori si è in grado anche di avere indicazioni sugli interventi da operare, sui tempi e sulle modalità di intervento. Al fine di soddisfare gli elevati requisiti di qualità che debbono essere garantiti sia per quanto attiene alla produzione sia per quanto si riferisce ai materiali di base utilizzati nei processi produttivi, sono introdotti sistemi di controllo e di garanzia della qualità che accompagnano tutte le fasi di produzione. Si può quindi affermare che il **sensore è soggetto ed oggetto della qualità**, nel senso che un sensore è parte integrante di quasi tutti i sistemi di produzione in qualità ed al tempo stesso anche la sua produzione richiede un'organizzazione in qualità. Particolare cura va posta alle **prove**, ai **controlli** e ai **collaudi**. Il fornitore dei sensori deve predisporre e mantenere attive **procedure** documentate per le attività di prova, controllo e collaudo allo scopo di validare i requisiti specificati per il sensore. Le prove, controlli e collaudi richiesti e le registrazioni da eseguire devono essere indicati nel **piano della qualità** o in procedure documentate. Il fornitore deve assicurarsi che il prodotto in arrivo non sia utilizzato o messo in lavorazione senza essere stato controllato, ovvero che si sia accertato in altro modo la sua **conformità** ai requisiti specificati. L'organizzazione deve anche predisporre e mantenere attive procedure documentate per evitare che venga involontariamente utilizzato o installato un prodotto non conforme. Devono essere definite le responsabilità per l'esame del prodotto non conforme e l'autorità per le relative decisioni. Il prodot-

to non conforme deve essere esaminato secondo procedure documentate. Inoltre si devono predisporre e mantenere attive procedure per identificare il prodotto con mezzi adeguati, a partire dal ricevimento e durante tutte le fasi di produzione, consegna e installazione. L'organizzazione deve conservarne le registrazioni, che devono identificare il responsabile del controllo e collaudo per il rilascio del prodotto. Le apparecchiature per prova, **misurazione e collaudo** vanno periodicamente controllate, tarate e sottoposte a manutenzione. La taratura è solo una delle fasi della **conferma metrologica** di tali apparecchiature. Per assicurare la loro conformità ai requisiti metrologici occorre seguire le indicazioni contenute nella norma UNI EN ISO 10012, sia nella fase della loro messa in servizio, sia quando si siano verificate condizioni che possono aver pregiudicato il loro corretto funzionamento (urti, sovraccarichi, grandezze d'influenza temibili, ecc.), sia quando si teme che la deriva strumentale possa aver ridotto la loro accuratezza. La **verifica della taratura** deve essere eseguita ad intervalli prefissati e prima dell'uso, impiegando strumenti certificati riferibili a campioni di misura riconosciuti nazionali o internazionali. In mancanza di tali campioni di misura il criterio utilizzato sia per la taratura, sia per la verifica deve essere documentato. Data la sempre maggiore rilevanza dei sistemi di prova automatici, si richiede che le procedure di verifica siano estese anche al software di prova. Le apparecchiature di prova, misurazione e collaudo devono essere scelte ed utilizzate in modo da assicurare che la loro **incertezza strumentale** di misura sia conosciuta e compatibile con le esigenze di misurazione richieste. Esse devono essere verificate prima della loro utilizzazione in produzione, installazione o assistenza e devono essere ricontrollate a intervalli di tempo e di uso prefissati solitamente dal costruttore dell'apparecchiatura di misura. L'organizzazione deve conservare le relative registrazioni.

È bene anche sottolineare la necessità di **verifiche ispettive** interne della qualità. L'organizzazione deve predisporre e mantenere attive procedure documentate per la pianificazione e l'esecuzione di verifiche ispettive interne per la qualità, allo scopo di accertare se le attività inerenti alla qualità e i relativi risultati siano in accordo con quanto pianificato e per valutare l'efficacia del sistema qualità. Le verifiche ispettive interne per la qualità devono essere programmate in funzione della importanza della attività da verificare e devono essere eseguite da personale indipendente da chi ha diretta responsabilità delle attività da sottoporre a visita ispettiva. I risultati devono essere registrati e portati all'attenzione di chi ha la responsabilità dell'area verificata perché questi intraprenda tempestive azioni correttive.

È importante anche la **gestione del magazzino**, che può risultare molto dispendiosa. Con la politica del ***just in time*** si cerca di rendere minime le giacenze di magazzino in termini sia di materie prime, sia di prodotto finito. Per quanto attiene alla gestione del magazzino l'organizzazione deve predisporre e mantenere attive procedure documentate sia per la **movimentazione**, allo scopo di impedire danni o deterioramenti, sia per l'**immagazzinamento** o deposito, allo scopo di evitare il danneggiamento o il deterioramento del prodotto in attesa della sua utilizzazione o consegna, sia per l'**imballaggio**, la **conservazione** e la **consegna** del prodotto. Per la **vendita e distribuzione** l'organizzazione si deve dotare di una rete quanto più estesa possibile di venditori nelle aree geografiche, nelle quali dalle indagini di mercato è risultata la presenza di potenziali clienti.

Cura va posta anche all'**installazione** del sensore, che in genere è demandata direttamente al cliente, quando risulti semplice, accompagnando il sensore con un piccolo manuale di installazione, che deve risultare facilmente comprensibile o, come è ormai invalso dire, amichevole nell'uso. Nel caso l'installazione sia demandata in fase contrattuale ai fornitori, sarà necessario porre molta attenzione. È bene sottolineare la delica-

tezza di questa fase, in cui si è a diretto contatto con il cliente. Un cattivo servizio può vanificare completamente quanto fatto in precedenza per assicurare la soddisfazione del cliente. L'installatore deve essere non solo qualificato, ma anche a conoscenza delle procedure richieste dal manuale di qualità aziendale o, come si dice anche, dello stile dell'azienda, a salvaguardia del suo **marchio** o *brand*. Il manuale d'uso del sensore deve contenere istruzioni in merito anche alla **manutenzione** del prodotto. Il cliente si sentirà pienamente soddisfatto se potrà confidare nella continuità d'uso del sensore e, quindi, in un rapido intervento di personale qualificato, qualora trovi difficoltà nell'uso del prodotto o ritenga che questo abbia subito un guasto. Il manuale d'istruzioni deve contenere indicazioni dettagliate sulla migliore manutenzione del prodotto, ma è sempre bene addestrare personale qualificato per un eventuale pronto intervento. A tal proposito l'organizzazione deve predisporre e mantenere attive procedure documentate per individuare le necessità di addestramento del personale che svolge attività che hanno influenza sulla qualità. Il personale che svolge compiti particolari deve essere qualificato. La qualificazione si acquisisce attraverso un'adeguata istruzione, l'addestramento e l'esperienza acquisita.

Una fase delicata nel ciclo delle attività tese alla qualità è quella relativa ad attività e **verifica ex post**. Può essere considerata come il bilancio di tutte le procedure seguite, finalizzato, in un processo dialettico, ad attivare tutte quelle azioni correttive e preventive tese al miglioramento nell'organizzazione della qualità. Ogni azione correttiva o preventiva intrapresa per eliminare le cause di non conformità effettive o potenziali deve essere di livello appropriato all'importanza dei problemi e commisurata ai rischi relativi. L'organizzazione deve attuare tutte le modifiche derivanti dalle azioni correttive e preventive, registrandole nelle procedure documentate. A questo proposito sarà necessario attivare procedure documentate per l'identificazione, la raccolta, la catalogazione, l'accesso, l'archiviazione, la conservazione, l'aggiornamento e l'eliminazione delle registrazioni della qualità.

Ultima fase non meno delicata delle precedenti è quella attinente all'**eliminazione** o al **riciclaggio** del prodotto da sostituire. Le previsioni più ottimistiche sono che il terzo millennio sarà dedicato al benessere dell'uomo e alla prevenzione dei disagi. Questo progetto richiede una rivoluzione culturale che veda coinvolti i governanti, i lavoratori, i cittadini, gli insegnanti. Un ausilio considerevole a questo progetto potrebbe derivare da un cambiamento culturale, che consideri al centro di qualsiasi processo produttivo i bisogni dell'uomo e l'umanizzazione della tecnologia. In questi ultimi anni, molte grandi industrie e governi dei paesi più industrializzati incominciano a dedicare attenzione sempre crescente ai problemi dell'ambiente e della sua tutela, riconoscendone notevole importanza per le implicazioni non solo sociali, ma anche economiche e aziendali. L'inquinamento ambientale è un problema ormai noto a tutti, in un certo periodo storico i lavoratori si sono sentiti minacciati dal movimento ecologista, per timore di perdita del posto di lavoro. Oggi la qualità della vita e la difesa dell'ambiente non sono più in antitesi al mantenimento del posto di lavoro e alla promozione della sicurezza, in quanto si è chiaramente compreso che non vi sono più motivi per pensare che il miglioramento delle condizioni ambientali possa causare chiusura di impianti o perdita dei posti di lavoro, anzi il controllo dell'inquinamento ambientale anche fuori dalle aziende e la difesa del suolo possono determinare nuovi profitti e nuova occupazione. Un'azienda quindi che si faccia carico dell'eliminazione o del riciclaggio dei sensori in disuso o del riutilizzo di loro parti acquisisce meriti in campo sociale ed è fortemente apprezzata da una clientela, sempre più numerosa, attenta alla conservazione dell'ecosistema. Non va sottaciuto che l'Unione europea ed alcuni enti pongono il vincolo del riciclaggio o riuso tra le clausole di molti loro bandi di gara.

Una procedura operativa per la realizzazione di un prodotto o servizio deve essere realizzata nel rispetto dei requisiti di qualità del processo, tutelando l'ambiente oltre alla sicurezza e alla salute dei lavoratori. Si potrebbe, quindi, unificare e giungere a una sola politica aziendale per la qualità, la sicurezza e la difesa dell'ambiente.

3.11 - Affidabilità dei sensori

Uno dei requisiti richiesti ad un sensore di qualità è un'elevata affidabilità. Limitazioni e difetti nella progettazione e realizzazione di un sensore, deterioramenti legati al suo uso intenso o a condizioni operative anomale, l'influenza delle condizioni ambientali sono fattori che possono causare incertezze ed errori nella risposta del sensore. Allo scopo di studiare l'influenza di questi fattori sul suo funzionamento e sulle sue caratteristiche nel tempo, in modo da poterla quantificare, è stato introdotto il concetto di affidabilità. Si associa un elevato grado di affidabilità di un sensore a un buon progetto, a una corretta costruzione, all'utilizzazione di componenti di qualità.

L'inizio dello studio dell'affidabilità si può far risalire intorno al 1930. Il maggiore sviluppo è avvenuto in campo militare e aerospaziale. Con gli inizi degli anni 70 si è avuta una significativa incidenza anche in campo industriale. Oggi l'affidabilità è presa in considerazione in diverse discipline soprattutto in campo ingegneristico, biomedico e scientifico in generale. Senza tema di smentita è però opportuno sottolineare che le maggiori applicazioni dell'affidabilità si sono avute e continuano ad aversi nel campo dell'elettronica e dell'informatica.

Al concetto di affidabilità è legato il controllo di qualità che si è diffuso negli ultimi anni soprattutto nel campo dei processi manufatturieri. La necessità di assicurare il corretto funzionamento di un dispositivo per tempi prefissati, ha indotto a quantificare i valori dell'affidabilità. Ciò richiede una serie di misure o prove di affidabilità tese a evidenziare l'insorgere di **guasti** o di malfunzionamenti al di fuori delle specifiche. Per guasto (o *failure*) si intende la cessazione dell'attitudine di un oggetto ad adempiere alla funzione richiesta. Si definisce invece **avaria** (o *fault*) lo stato dell'oggetto, caratterizzato dall'inabilità di adempiere alla funzione richiesta. I costruttori seri specificano tra i dati tecnici di un sensore i valori di affidabilità o altri parametri ad essa legati. In genere il raggiungimento di elevati livelli di affidabilità in un sensore è vincolato al contributo congiunto del progettista, del costruttore, del collaudatore, del controllore di qualità, dell'installatore e dell'utilizzatore.

I concetti precedentemente esposti, in sintesi, sono riassumibili nelle varie definizioni di **affidabilità,** considerata l'insieme dei concetti, teorie matematiche, modelli, analisi di comportamenti fisici, aventi lo scopo di descrivere, prevedere e dominare il comportamento degli oggetti nel tempo. Le norme UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) la definiscono l'attitudine di un oggetto ad adempiere alla funzione richiesta nelle condizioni fissate e per un periodo di tempo stabilito**.** Per affidabilità di un sensore si può quindi intendere la probabilità che esso esplichi la funzione richiesta in condizioni stabilite per un periodo di tempo specificato. Una probabilità zero o affidabilità nulla sta a significare che il sensore è guasto o non funzionante secondo le specifiche. Una probabilità uno o massima affidabilità significa che un guasto del sensore è una evenienza molto improbabile.

Una caratteristica importante è anche quella di **ciclo** o **tempo di vita** di un sensore. Per esso si intende il tempo totale tra la nascita e la morte del sensore quando operi nelle condizioni definite da uno specificato schema di manutenzione, prefissato a priori.

La **vita operativa** (o **tempo di funzionamento**) è il minimo intervallo di tempo nel quale il sensore opererà in modo continuativo o intermittente, con cicli di lavoro prefissati, senza variazioni nelle sue caratteristiche di funzionamento entro limiti di errore definiti. Il **numero di cicli** è il numero di escursioni del misurando da un estremo all'altro del campo di misura o fra due limiti diversamente specificati cui si sottopone il sensore senza che si presentino variazioni nelle sue caratteristiche di funzionamento entro limiti di incertezza strumentale definiti.

Le caratteristiche di affidabilità del sensore dipendono molto dalla cura con cui esso è utilizzato, dal rispetto delle condizioni di sicurezza, dall'assenza o dal controllo di condizioni ambientali particolarmente avverse. È evidente che esiste una relazione stretta tra la filosofia di produzione di un sensore e la sua affidabilità. Fortunatamente sempre più in ambito industriale si sta affermando il principio propugnato da alcune aziende americane del *pay now, save later* (tradotto letteralmente "paga ora, risparmi più tardi"). Infatti il buon nome di un **marchio** (*brand*) si conquista negli anni, immettendo sul mercato prodotti sempre più affidabili oltre che naturalmente sicuri per le persone e per le cose. Spesso inoltre in un sistema complesso le conseguenze di un guasto ad un sensore o ad un suo componente sono difficilmente prevedibili e possono determinare blocchi e danni inimmaginabili. A questo proposito in seguito si introdurrà un'altra caratteristica importante che è quella di disponibilità.

Per quantificare quanto espresso precedentemente e per chiarire meglio che l'affidabilità è una caratteristica temporale della qualità, si considerino N componenti in numero molto elevato e si provino per un tempo t. Se si indicano con N_s il numero di componenti che non hanno subito guasti e con N_f il numero di quelli che hanno subito guasti, si definiscono **affidabilità** $R(t)$ e **inaffidabilità** $Q(t)$ le seguenti quantità:

$$R(t) = \frac{N_s}{N} = \frac{N - N_f}{N} \qquad Q(t) = \frac{N_f}{N}$$

poiché il numero totale dei componenti è la somma di quelli guasti e di quelli sani, $N = N_f + N_s$, dalle precedenti equazioni si desume che la somma dell'affidabilità e dell'inaffidabilità è pari ad uno: $R(t)+Q(t)=1$. L'affidabilità è una funzione che varia con il tempo da *1*, all'inizio della prova quando tutti i componenti sono integri ($t=0$), fino a *0*, quando tutti i componenti hanno subito un guasto. In realtà, come si verificherà anche in seguito, con N_f si può indicare sia il numero di guasti di un dispositivo, sia il numero di componenti in prova che subiscono guasti.

I guasti possono essere dovuti a difetti costruttivi o a errata utilizzazione. In genere si distinguono come si è detto precedentemente i guasti e le avarie, od anche i **guasti catastrofici** e **marginali**. I guasti catastrofici o semplicemente guasti sono improvvisi e completi e impediscono completamente l'espletamento della funzione del componente. I guasti marginali (definiti anche da **degrado**) o avarie sono sia graduali sia parziali e non consentono un funzionamento pienamente rispondente alle specifiche; essi sono dovuti nella maggior parte dei casi a perdita delle caratteristiche metrologiche e a degradazione dei materiali costituenti un sensore, uno strumento, un sistema. In genere le avarie o guasti marginali sono più temibili in quanto possono dar luogo a errori difficilmente valutabili. Quando si individua un guasto o un'avaria in un sensore, in uno strumento è sempre bene che l'utilizzatore lo annoti e lo faccia presente al costruttore. Queste informazioni possono risultare estremamente utili per individuare punti deboli in modo

tale che nella revisione del progetto si migliori il manufatto eliminando i componenti del sensore che per esempio non sopportano determinati sovraccarichi.

È evidente che l'affidabilità richiesta ad un sensore dipende molto dall'utilizzazione che se ne vuole fare. Per esempio i sensori utilizzati nel campo aerospaziale e biomedico devono avere un'affidabilità molto elevata, che comporta naturalmente alti costi. I fattori o parametri che caratterizzano l'affidabilità e la qualità di un sensore si suddividono in costruttivi, operativi e ambientali. I **fattori costruttivi** sono legati al progetto del sensore. Ad esempio nei sensori che presentano organi mobili, la presenza degli attriti può determinare guasti marginali difficilmente rilevabili oltre che prevedibili in sede di progetto. Un difetto nell'unità aritmetica in un sensore intelligente può essere causa di errori e malfunzionamenti non previsti. Il miglioramento dell'affidabilità o dell'adeguatezza, in relazione a possibili difetti costruttivi, è legato a una corretta progettazione e a una buona realizzazione del sensore. I **fattori operativi** sono legati al funzionamento del sensore. Guasti marginali possono insorgere a causa di variazioni delle caratteristiche dei componenti, dovute a deterioramento fisico o chimico dei materiali. Questo deterioramento è naturale, ma può essere accelerato da una utilizzazione del sensore oltre i limiti imposti in sede di progetto. In questo caso verifiche della taratura, regolazioni e collaudi frequenti possono aumentare l'affidabilità e la disponibilità del sensore. I **fattori ambientali** sono spesso i più temibili. Un'elevata affidabilità è sempre assicurata solo quando il sensore operi in laboratorio in condizioni ambientali controllate. Forti gradienti di temperatura riducono l'affidabilità per gli effetti deleteri sui materiali. L'alta umidità è un'altra causa di incremento del tasso di guasto, specie se associata con elevate temperature.

In un sensore o in un sistema sensorio si possono distinguere alcune parti che dopo un certo tempo devono essere sostituite, altre che richiedono una periodica manutenzione per assicurare prefissate prestazioni. Alcune parti inoltre in caso di guasto vanno sostituite, altre possono essere riparate. È ovvio allora che il lavoro di un responsabile della manutenzione risulta notevolmente facilitato quando abbia a disposizione i tempi medi entro i quali occorre intervenire, per sostituire o riparare, in modo da assicurare il corretto funzionamento di un sensore. Con riferimento alle parti non riparabili si definisce un **MTTF** (acronimo di *Mean Time To Failure*, ovvero tempo medio al guasto) come la misura del tempo medio al guasto di un gran numero di sensori o componenti uguali che operano tutti nelle stesse condizioni operative e ambientali. In base a tale definizione se N sono i componenti in prova e t_i è il tempo necessario perché il generico componente *i-esimo* subisca un guasto, si ha:

$$MTTF = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} t_i = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

La misura dell'MTTF è in genere eseguita su un numero ridotto di componenti, ma può richiedere un tempo proibitivo. Per questo in molti casi si preferisce provare un numero di componenti di uno o di due ordini di grandezza maggiore del precedente, per un periodo più breve, e determinare il numero totale di guasti nel **tempo cumulativo** delle prove alle quali sono sottoposti i componenti. Se questi sono N_p e sono provati tutti per uno stesso tempo t_p, il tempo cumulativo t_c risulta pari a N_p t_p Nell'ipotesi che nel tempo t_c siano N_f i componenti che subiscono guasti, si ha che l'MTTF può essere espresso come rapporto tra il tempo cumulativo e il numero di componenti che in quel periodo di tempo si guastano: $MTTF = t_c / N_f$. È evidente che l'equazione precedente

fornisce semplicemente una stima dell'MTTF effettivo. Si definiscono pertanto un intervallo e un limite di confidenza, stabiliti in funzione di N_p e t_p. Perché si abbia un elevato livello di confidenza il numero di componenti N_f che subiscono guasti deve essere significativo.

Per quei dispositivi che dopo aver subito un guasto possono essere riparati si definisce un **MTBF** (acronimo di *Mean Time Between Failures*, tempo medio tra guasti) che si calcola nello stesso modo dell'MTTF definito precedentemente. L'MTBF è legato alle condizioni operative cui è soggetto il sistema oltre che a quelle ambientali. A volte accanto all'MTBF è fornito anche l'MTTFF (acronimo di *Mean Time To First Failure*), che è il tempo al primo guasto di un sistema riparabile.

Un altro parametro legato all'MTBF è la **disponibilità**, *D,* definita come l'attitudine di un oggetto ad essere in grado di svolgere una funzione richiesta a un dato istante o durante un dato intervallo di tempo, in condizioni determinate, supponendo che siano assicurati i mezzi esterni eventualmente necessari:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

dove l'**MTTR** (acronimo di *Mean Time To Repair*, tempo medio alla riparazione) è il tempo medio necessario alla riparazione del guasto, includendo il tempo per la diagnosi, per la localizzazione del guasto e per il lavoro meccanico. Dall'equazione precedente risulta che si ha massima disponibilità, a parità di MTBF, quanto minore è l'MTTR. Un metodo per migliorare la disponibilità di un sensore è quello della **ridondanza**, che consiste nell'aggiungere un dispositivo addizionale in parallelo a uno gemello, in modo che lo rimpiazzi in caso di guasto. In tal modo il guasto del sensore non causa l'andata fuori servizio dell'intero sistema. Quando in un sistema ridondante si ha la commutazione di un componente sano su uno guasto, in tempi brevissimi, si aumenta notevolmente la disponibilità del sistema.

Sono state sviluppate diverse tecniche matematiche per il calcolo sia della affidabilità sia della disponibilità. Nel caso di sistemi riparabili le tecniche più utilizzate sono quelle markoviane, in grado di descrivere il comportamento stocastico del sistema nel caso di una gran varietà di guasti e di condizioni di riparabilità. Quella di una elevata disponibilità è una qualità che molti utilizzatori richiedono ai componenti, ai sensori, agli strumenti, ai sistemi. Infatti a volte anche poche ore di non utilizzabilità di questi possono comportare rilevanti danni alla produzione, per non dire che a volte occorrono diverse settimane per la riparazione di un componente reso alla ditta costruttrice. È ovvio quindi che anche se un dispositivo presenta elevati gradi di affidabilità, ovvero basse probabilità che subisca guasti, non è detto che soddisfi pienamente alle esigenze dell'utente se la sua disponibilità risulta bassa, ovvero è notevole il tempo che rimane non utilizzabile quando si guasta. I sensori intelligenti, in cui sia prevista la autodiagnosi, quindi la localizzazione del guasto, e che siano in grado di fornire indicazioni sul modo di ripararlo, consentono di aumentare notevolmente la disponibilità. Allo stesso scopo è necessario istruire in fabbrica gli addetti al servizio riparazioni che devono avere conoscenze nel campo delle misure e della componentistica. Inoltre è auspicabile che il reparto acquisti della fabbrica si accerti che i componenti necessari alla riparazione siano forniti da buoni costruttori e rispondano alle specifiche fornite. A questo fine è raccomandabile una prova dei componenti per campioni. Non bisogna neanche sottovalutare la giacenza in magazzino dei componenti occorrenti alla riparazione; essa non dovrebbe

mai essere molto lunga, perché, a parte i costi del magazzino, i componenti nel tempo modificano le loro caratteristiche. A volte si richiede che siano tenute sotto controllo la temperatura e l'umidità del magazzino.

Una particolare categoria di **sensori** è quella dei **tolleranti all'avaria** (anche se è diffuso dire **tolleranti al guasto**, o anche, con la dizione inglese, ***fault tolerant***). I sensori ed attuatori tradizionali sono vulnerabili, soggetti a possibili guasti ed avarie. Questi guasti possono causare malfunzionamenti in tutta la catena di produzione, con gravi conseguenze al ciclo produttivo. Un sensore che abbia subito nel tempo una variazione delle sue caratteristiche in genere non determina il blocco della catena di produzione, ma non ne consente il corretto funzionamento. Per esempio, in uno stabilimento di imbottigliamento automatico del vino se un sensore di posizione non funziona correttamente può determinare il non allineamento tra il collo della bottiglia e il tubo di immissione del vino, con una notevole perdita del liquido. Stesse considerazioni possono essere fatte per il sensore di livello, destinato ad arrestare il flusso del vino quando ha raggiunto il giusto livello. Lo scopo principale di un sensore *fault tolerant* è evitare che avarie localizzate possano ripercuotersi su tutto il processo produttivo, portando a gravi rischi. Sensori tolleranti all'avaria sono impiegati anche in campo medico per assicurare la sicurezza e la salute dei pazienti. Questi sensori sono in grado di rivelare, stimare e compensare possibili malfunzionamenti al loro interno, in modo da non interrompere il funzionamento del sistema dove sono inseriti. Essi segnalano anche la condizione di avaria in modo che il gestore del sistema possa ripristinarne appena possibile la piena funzionalità del sensore senza compromettere il ciclo produttivo. Essi dispongono di un **rivelatore** di **limite di errore**. Come si è detto, questo limite, indicato anche come **errore di misura massimo ammissibile**, è definito come il valore estremo dell'errore di misura in rapporto a un valore noto di una grandezza di riferimento, permesso dalle specifiche o dalle regolazioni di un sensore. Quando si è raggiunto questo valore di soglia si procede alla commutazione automatica su un componente sano, interno al sensore che ne permette il ripristino del funzionamento secondo le sue specifiche. Spesso la commutazione fra i diversi componenti uguali all'interno del sensore avviene con una certa frequenza prestabilita, questa procedura rende molto improbabile l'evenienza di commutazione su un elemento in avaria quando si sia rivelata la presenza dell'errore massimo ammissibile in uno dei due componenti. È ovvio che la commutazione è bloccata quando uno dei due componenti è in avaria. La condizione è segnalata, in modo che appena possibile si sostituisca o si ripari tale componente, quando è fermo il ciclo produttivo. Questa tecnica è molto costosa in quanto richiede la presenza all'interno dei sensori o dei sistemi sensori del doppio dei componenti strettamente necessari per la loro realizzazione. Una tecnica meno costosa anche se meno affidabile è quella di sottoporre il sensore a frequenti autoregolazioni che ne correggano gli errori in modo che non si raggiunga l'errore di misura massimo ammissibile e quando questo non è possibile si ferma automaticamente il ciclo inviando contemporaneamente un segnale al gestore del sistema in modo che sappia dove si è verificato il guasto e si possa ridurre al minimo l'MTTR. Questo ultimo tipo di **sensore** è detto **a controllo di guasto** (*fail controlled*).

Un altro parametro utile per lo studio dell'affidabilità di un sensore è il tasso di guasto $\lambda(t)$ definito nel modo seguente:

$$\lambda = \frac{1}{N_s}\frac{dN_f}{dt}$$

dove $d\,N_f$ è il numero di guasti che si verifica nel tempo dt. Il modo in cui $\lambda(t)$ varia nel tempo dipende sia da parametri costruttivi (eventuali difetti in parti del sensore), sia da parametri operativi (condizioni anomale di funzionamento del sensore), sia da parametri ambientali (particolari condizioni termiche o di umidità o di salinità, ecc.). In molti casi l'andamento nel tempo di λ assume la forma tipica di una vasca da bagno, come indicato in Fig. 3.3. Nella vita di un sensore, o di un dispositivo in genere, si distinguono tre fasi. La prima, detta infantile termina al tempo t_1 ed è caratterizzata dai guasti di molti componenti a causa di materiali difettosi o di imperfezioni nel processo di lavorazione. In genere i componenti difettosi sono sostituiti in una fase iniziale (equivalente per esempio a quella di rodaggio). Terminata questa prima fase, ne segue una seconda, caratterizzata da un tasso di guasto costante, fase in cui il sensore è impiegato al meglio, in quanto è bassa la probabilità che si verifichino guasti, dovuti quasi esclusivamente a fortuite combinazioni di parametri operativi che danno luogo all'insorgere di pericolose sollecitazioni. La terza e ultima fase inizia dopo il tempo t_2, prende il nome di periodo senile ed è caratterizzata da un crescente tasso di guasto. Se si vuole aumentare la disponibilità del sensore dopo il tempo t_2, occorre intervenire nella fase in cui il tasso di guasto si mantiene costante, provvedendo a un'accurata manutenzione con sostituzione dei componenti più facilmente deteriorabili con l'uso.

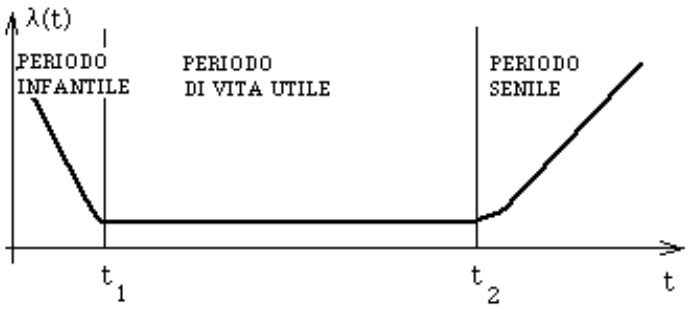

Figura 3.14 - Andamento del tasso di guasto

Il tempo intercorrente tra t_1 e t_2 è detto anche **vita utile** del sensore e in tale periodo esiste un'interessante relazione tra il tasso di guasto costante e l'affidabilità $R(t)$. Infatti integrando $\lambda(t)$ tra 0 e t, tempo in cui si sono verificati N_f guasti, ricordando la relazione tra numero N complessivo di componenti provati, il numero N_f dei componenti che si guastano e il numero N_s dei componenti sani, si ha:

$$\lambda\int_0^t dt = \int_0^{N_f} \frac{dN_f}{N-N_f}; \quad -\lambda t = \ln(N-N_f) - \ln N; \quad R(t) = 1 - \frac{N_f}{N} = e^{-\lambda t}$$

L'equazione precedente di $R(t)$ mostra come sia possibile calcolare in modo semplice l'affidabilità di un dispositivo durante la sua vita utile, noto il tasso di guasto, quando questo sia costante. Precedentemente si è indicato con N_f sia il numero di guasti di un dispositivo, sia il numero di componenti in prova che subiscono guasti. Infatti, essendo il tasso di guasto costante è indifferente provare un componente per t_o ore o N compo-

nenti uguali per t_o/N ore, in quanto la probabilità di guasto in un tempo prefissato sarà la stessa nei due casi. Ne consegue intuitivamente che il tasso di guasto costante (che ha le dimensioni dell'inverso di un tempo) risulta coincidere con l'inverso dell'MTTF per i componenti non riparabili e dell'MTBF per le parti del sensore riparabili. Allo stesso risultato si può pervenire matematicamente ricordando la definizione di MTBF, coincidente con quella data per l'MTTF:

$$MTBF = \frac{1}{N_s}\sum_{i=1}^{N} t_i = \int_0^{\infty} R(t)dt = \frac{1}{\lambda}$$

È importante introdurre un'altra definizione che consente di semplificare spesso i calcoli, quella del *tasso di riparazione*. Questo è definito come la frequenza per unità di tempo con la quale si effettuano le operazioni di riparazione e si indica con μ, spesso espresso in inverso di numero di ore. È interessante notare che il valore reciproco di μ è l'MTTR, il che è in completa analogia con il tasso di guasto e l'MTBF.

La legge di distribuzione esponenziale dell'affidabilità si rivela particolarmente utile nei sistemi sensori costituiti da catene di componenti, funzionalmente posti in serie e dove quindi il guasto su un componente non dipende dalle operazioni svolte dalle altre parti del sistema. In tal caso il guasto di un componente causa l'andata fuori servizio dell'intero sistema. Per i sistemi in serie o in cascata, l'affidabilità del sensore è data dal prodotto delle affidabilità dei singoli componenti, per cui si ha:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^{N} R_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^{N}\lambda_i t} = e^{-\lambda t}$$

dove $R_s(t)$ è l'affidabilità del sistema, $R_i(t)$ quella del generico componente i-esimo, λ_i il tasso di guasto relativo all'i-esimo componente e λ quello del sistema. Dalla precedente si ha:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + ... + \lambda_N = \frac{1}{MTBF}$$

Dalla relazione precedente si desume che un sistema serie, anche se economico, in quanto non vi sono ridondanze, presenta un aumento del tasso di guasto e una riduzione del tempo medio al primo guasto, ovvero peggiora l'affidabilità. Il contrario avviene nel caso di componenti in parallelo, cioè di un sistema ridondante, dove sono le inaffidabilità delle singole parti del sistema che si moltiplicano per determinare l'inaffidabilità di quel componente costituente il sistema sensorio; in altre parole nel caso di componenti in serie si ha un prodotto di valori di affidabilità, nel caso di componenti in parallelo si ha un prodotto di inaffidabilità. Quindi in un sistema ridondante si ha un miglioramento dell'affidabilità tanto maggiore quanto più elevato è il numero di componenti in parallelo.

3.12 - Caratteristiche metrologiche ambientali

Le condizioni ambientali quando un sensore operi sia al chiuso di un laboratorio sia all'aperto possono alterarne il funzionamento. Si ricorda che il costruttore nel fornire le **condizioni operative assegnate** o **di targa**, deve indicare quelle relative non solo al misurando, ma anche alle grandezze d'influenza e lo stesso deve fare per le **condizioni operative limite**. Il costruttore è tenuto inoltre, nell'indicare le **condizioni operative di riferimento,** a fornire gli intervalli dei valori sia del misurando sia delle grandezze d'influenza. Per cui quando sia prevista la possibilità che un sensore funzioni in condizioni ambientali differenti da quelle operative assegnate o, durante la verifica, da quelle in cui è stato tarato, è necessario che siano noti gli effetti causati dalle grandezze di influenza in modo da poter stabilire opportuni limiti di errore delle caratteristiche o fattori di correzione.

Il VIM definisce **variazione dovuta ad una grandezza d'influenza**, la differenza nell'indicazione del sensore per uno stesso valore del misurando, allorquando una grandezza d'influenza assume successivamente due valori differenti.

Per esempio l'**effetto di temperatura** deve essere noto e portato in conto in tutti i tipi di sensori. Come si è detto già in precedenza, molti costruttori incorporano nella strumentazione degli elementi dedicati a compensare gli effetti della temperatura. Gli effetti termici possono determinare sia deriva dell'*offset*, ovvero uno scostamento termico dallo zero della curva di taratura, sia una alterazione della sua pendenza, ovvero una variazione termica della sensibilità. La conoscenza di questi errori è utile quando si vogliano apportare le appropriate correzioni ai dati finali o quando si voglia regolare la curva di taratura in modo da riportare l'errore al di sotto dell'incertezza strumentale. Un modo più generale per stabilire l'entità dell'effetto termico è quello di definire un possibile incremento dell'ampiezza della *fascia d'incertezza addebitabile alla temperatura*. In altri termini il costruttore potrebbe riportare un valore dell'incertezza strumentale maggiorato relativamente ad un campo di valori della temperatura superiore a quello indicato nelle condizioni operative assegnate o di targa.

Considerazioni analoghe a quelle fatte per la temperatura valgono per gli **effetti della pressione ambientale**, che si possono presentare in alcuni strumenti progettati per funzionare alla pressione atmosferica al livello del mare e utilizzati a grandi altitudini, o negli aeromobili o nelle navicelle spaziali (dove la pressione dell'ambiente si avvicina a quella del vuoto) o a grandi profondità sottomarine (dove la pressione è molto alta). Il funzionamento del sensore può essere alterato a causa delle deformazioni del contenitore o delle variazioni della geometria interna del sensore. Anche in questo caso può essere fornito l'errore nell'indicazione del sensore dovuto al superamento dei valori di pressione ambientale indicati nelle condizioni operative di targa perché si possa effettuare la correzione.

Esistono diverse altre grandezze di influenza, come per esempio l'umidità e la vibrazione. Poiché è difficile poterle prendere tutte in esame, in sintesi si può dire che sarebbe buona norma che il costruttore fornisse alcuni campi di valore delle grandezze d'influenza più temibili, che potrebbero inficiare il corretto funzionamento del sensore. In particolare si potrebbero indicare i seguenti campi. Il **campo di riferimento** è quello entro il quale deve essere compresa la grandezza di influenza durante la taratura o una successiva verifica. Il **campo assegnato o di targa o di normale funzionamento** è quello entro il quale deve essere compresa la grandezza di influenza durante l'utilizzazione di un sensore perché siano rispettate le caratteristiche metrologiche. Il **campo limite o di sicurezza** è quello entro il quale deve essere compresa la grandezza di influenza durante l'utilizzazione del sensore perché esso non subisca guasti. Il **campo di magazzino** si riferisce alle condizioni ambientali del magazzino da rispettare per evitare un precoce invecchiamento del sensore.

4 - Principi fisici dei principali sensori

Introduzione

Diversi sono i principi sui quali si basano i sensori. Lungi dal voler essere esaustivi, nel seguito si accenna ad alcuni tra i più diffusi tra questi principi. Data l'espansione che i **sensori ottici** hanno avuto recentemente, si esaminano inizialmente i principi su cui essi si basano. Tali sensori sono impiegati in diversi settori, possono sfruttare differenti fenomeni, ed utilizzano un'ampia gamma di frequenze di radiazione. A quelli di concezione tradizionale, basati sull'impiego della luce visibile e di rivelatori a variazione di resistenza, si sono sostituiti quelli con emettitori a LED (*light emitting diode*) e rivelatori al silicio, che possono essere **fotodiodi**, in particolare quelli PIN (caratterizzati da uno spessore della regione di svuotamento controllato giustapponendo del semiconduttore intrinseco fra gli strati di tipo p e di tipo n), o **fototransistor**. Molto impiegato per la realizzazione dei LED è l'arseniuro di gallio che ha una banda di emissione (circa 0,7 – 0,9 μm) bene adattabile alla regione di assorbimento del silicio. Per permettere una emissione di luce più efficiente si pone l'arseniuro di gallio su un substrato di fosfuro di gallio. Inoltre si stanno diffondendo anche sensori ottici basati sulle fibre ottiche, le quali non solo sono sensibili a diverse grandezze fisiche e chimiche, ma hanno permesso di risolvere problemi particolari di trasmissione dei dati in ambienti industriali ostili caratterizzati dalla presenza di intensi rumori elettromagnetici. Infatti le fibre ottiche oltre ad avere un livello di attenuazione incredibilmente basso ed una elevata velocità di trasmissione sono intrinsecamente immuni al rumore elettromagnetico, essendo realizzate in vetro e in altri materiali non conduttori. Infatti i campi elettromagnetici non possono indurre correnti elettriche nel vetro che è un materiale dielettrico, come invece accade in presenza di cavi in materiale conduttore come il rame. Inoltre i campi elettromagnetici non modificano le caratteristiche della luce che attraversa la fibra ottica.

Si esamina quindi l'**effetto *Doppler***, che consiste nella variazione di frequenza delle onde acustiche, ottiche o radio dovuta al moto relativo tra sorgente e ricevitore delle onde. Tale effetto è impiegato in svariati campi come quello dei sensori radar di velocità, diffusi in campo sia automobilistico, sia militare, dove tra l'altro servono per avere indicazioni sulla velocità radiale dei bersagli aerei. I sensori sonar ad effetto *Doppler* acustico sono quelli più indicati per la determinazione della velocità di un veicolo sottomarino. Molti sensori di flusso si basano sugli effetti prodotti dalla propagazione di onde ad ultrasuoni, con trasmettitore e ricevitore generalmente di tipo piezoelettrico, o di onde appartenenti al campo ottico. Svariate sono le applicazioni in campo medico, come in quello della pletismografia, per lo studio delle variazioni di volume degli arti in funzione del ciclo o del deflusso venoso. I sensori *Doppler*, in questo settore servono per misurare le variazioni di volume delle arterie, delle vene periferiche, della carotide o per la misura della pressione sistolica.

Un altro effetto preso in esame è quello **piezoelettrico** che si presenta in certi cristalli,

i quali sottoposti a pressione generano sulle facce opposte cariche elettriche proporzionali allo sforzo esercitato su di loro. L'effetto piezoelettrico diretto può essere utilmente sfruttato nella realizzazione di sensori impiegati in tutte quelle applicazioni che richiedono misure accurate di variazioni di forze, pressioni e accelerazioni. L'effetto piezoelettrico inverso è sfruttato nella realizzazione di risonatori piezoelettrici e di attuatori. I sensori piezoelettrici sono sensibili sia alla forza lungo un asse, sia alla coppia intorno all'asse stesso, il che li rende particolarmente idonei al controllo in tempo reale sia dell'intensità, sia della direzione delle forze e delle coppie applicate per esempio da un robot agli oggetti manipolati. Sensori piezoelettrici di forza e di coppia sono denominati anche **celle di carico**. Le applicazioni nei laboratori e nei processi industriali continuano a crescere, soprattutto in campo aerospaziale, biomedico, strutturale e meccanico.

Si esamina poi l'**effetto piroelettrico** che consiste nella polarizzazione di particolari cristalli quando siano soggetti a variazione di temperatura, in quanto l'espansione del cristallo per effetto termico determina variazioni nella lunghezza dei dipoli elettrici. Naturalmente l'effetto è rivelabile solo quando il riscaldamento del cristallo è tale da determinare una sensibile variazione della polarizzazione. Questo effetto è utilizzato nei **bolometri**, che sono sensori di intensità luminosa basati sul riscaldamento prodotto dall'assorbimento di fotoni che genera una variazione di polarizzazione dielettrica nel cristallo piroelettrico. È preso quindi in considerazione l'**effetto piezoresistivo**, che consiste nella variazione della resistività di un materiale, e quindi della resistenza del sensore, quando è soggetto ad una deformazione dovuta ad uno sforzo ad esso applicato. L'effetto è molto piccolo nei metalli e più consistente nei materiali semiconduttori. Questo effetto è sfruttato nei sensori estensimetrici o *strain-gauge*. Prima dell'impiego dell'effetto piezoresistivo gli estensimetri erano di natura meccanica e l'amplificazione avveniva per mezzo di viti micrometriche, leve, ingranaggi e altri sistemi. Si tratta di estensimetri sviluppati negli anni tra il 1870 e il 1890. I primi sensori commerciali di deformazione, costituiti da resistenze elettriche, furono introdotti tra il 1930 e il 1938. Si fa risalire però al 1938 la reale invenzione degli estensimetri elettrici a resistenza, ad opera indipendente di due statunitensi: *E. E. Simmons* del *California Institute of Technology* ed *A. C. Ruge* dell'M.I.T. (*Massachussetts Institute of Technology*), in quanto fu loro l'idea di impiegare per la realizzazione dei sensori estensimetrici sottili fili di metallo, Simmons utilizzò costantana, incollati mediante un foglio di carta, che faceva da supporto, sulla struttura da controllare. L'anno 1938 è importante perché da più parti lo si considera quello della **nascita della sensoristica industriale**. Infatti gli estensimetri elettrici a resistenza da quell'anno ebbero una vastissima diffusione con vari impieghi, per l'analisi sperimentale degli sforzi nelle strutture (molto utilizzati nelle gru), per la caratterizzazione meccanica dei materiali e per la realizzazione di sensori di diverse grandezze.

La **magnetostrizione** è una proprietà dei materiali ferromagnetici, come ferro nichel e cobalto, i quali modificano la loro dimensione o forma, quando sono sottoposti ad un campo magnetico. Reversibilmente quando si applichi uno sforzo ad un materiale magnetostrittivo varia la sua permeabilità magnetica, per il cosiddetto effetto **magnetoelastico** o *Villary*. La distorsione elastica è detta anche effetto *Wiedemann.* Su questi effetti si basano efficaci sensori di posizione, di sforzo e di coppia. Alcuni materiali anisotropi, come l'antimoniuro di indio o come leghe nichel ferro, presentano un **effetto magnetoresistivo**, che rientra tra quelli **magnetogalvanici**. In un materiale magnetostrittivo la resistività e quindi la resistenza elettrica varia quando esso è sottoposto ad un campo magnetico esterno. Sensori di questo tipo sono impiegati per la lettura e scrittura di dati digitali sui dischi rigidi dei computer a costi ancora più contenuti rispetto a quelli di tipo

ottico. L'**effetto** galvanomagnetico più conosciuto è quello ***Hall***, che si manifesta in materiali sia conduttori sia semiconduttori con l'insorgere di una tensione elettrica in un materiale sottoposto ad un campo di induzione magnetica normale al flusso di una corrente elettrica che lo attraversa. Diverse sono le applicazioni di questo effetto che vanno dai sensori di campo magnetico e di corrente, tensione e potenza elettriche ai tachimetri.

Diversi sensori, per esempio di spostamento, forze, accelerazioni, basano il loro funzionamento su altri **effetti elettromagnetici**. Questi sensori presentano rispetto a quelli di natura resistiva in genere il vantaggio di non richiedere un contatto fisico con il misurando, il che assicura minore usura e maggiore durata, inoltre possono essere **sensori attivi**. D'altra parte risultano più complessi nella parte di condizionamento ed elaborazione del segnale.

L'**effetto termoelettrico** più noto, che è quello ***Seebeck***, si presenta quando due materiali conduttori di differenti caratteristiche energetiche sono saldati fra loro a due estremità e dà luogo ad una **termocoppia**. Quando una estremità della termocoppia è posta ad una temperatura maggiore dell'altra estremità, il circuito diventa sede di un passaggio di energia dalla parte calda alla parte fredda, che si manifesta con l'insorgere di un campo elettrico e la circolazione di corrente elettrica. Nel seguito si accennerà a diverse applicazioni delle termocoppie, specie con l'utilizzo della tecnologia MEMS.

L'**effetto termoresistivo** consiste nella variazione della resistività di un materiale con la temperatura. È presente sia nei metalli sia nei composti metallo ceramici sia nei semiconduttori, che presentano a differenza dei materiali metallici un coefficiente di temperatura negativo (NTC). Con un opportuno drogaggio anche i materiali semiconduttori possono essere resi tali da avere un coefficiente di temperatura positivo (PTC), come quelli metallici.

Gli **effetti capacitivi** hanno avuto recentemente un notevole sviluppo nei sensori realizzati con le tecnologie MEMS. Questi sensori presentano almeno un elemento in grado di muoversi al variare di un misurando, come ad esempio pressione, accelerazione o velocità. La configurazione più semplice è quella composta da un condensatore ad armature piane e parallele di cui una mobile. In realtà le configurazioni sono svariate, in dipendenza dell'applicazione, per esempio anche molto diffusa è quella a pettine, costituita in una delle sue realizzazioni da tre armature due periferiche collegate metallicamente tra loro ed una centrale in grado di scorrere all'interno delle altre due.

4.1 - Effetti fotonici

La **fotoemissione** consiste nell'emissione di elettroni da un materiale provocata da radiazioni elettromagnetiche appartenenti alla zona visibile e ultravioletta dello spettro, ma anche da radiazioni infrarosse, da raggi X e raggi δ. La fotoemissione si riscontra più facilmente in materiali solidi ed è denominata anche **effetto fotoelettrico esterno**.

Si consideri una superficie metallica investita da un fascio di luce di opportuna lunghezza d'onda. La superficie investita è caratterizzata da una **funzione lavoro** E_L, che è la quantità di energia richiesta per estrarre un elettrone da esso. Se la luce è monocromatica di frequenza f e lunghezza d'onda λ, la condizione per l'emissione di un elettrone è: $h f > E_L$, dove h è la *costante di Plank*. I sensori che utilizzano l'effetto fotoelettrico sono noti come **rivelatori fotoemissivi**. Questi sono realizzati mediante un catodo di un opportuno materiale e da un anodo tra i quali è applicata una elevata d.d.p. (intorno alle centinaia di volt) chiusi in un tubo. L'effetto di fotoemissione nei metalli è rappresentato in Fig. 4.1.

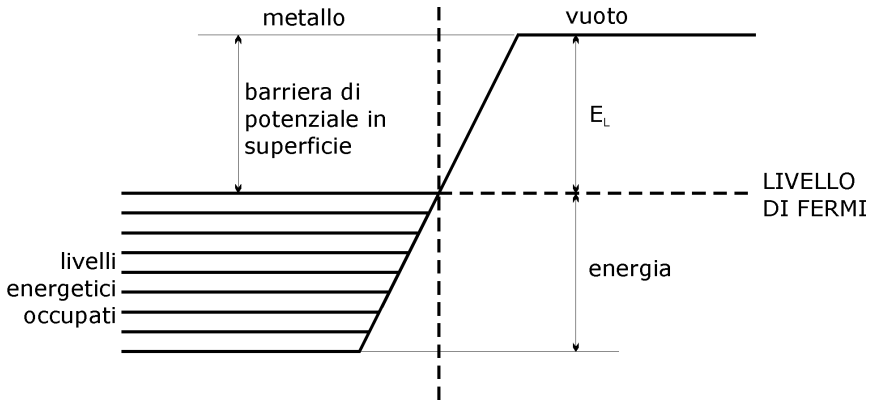

Figura 4.1 - Fotoemissione nei metalli

L'aspetto più importante della fotoemissione è che non vi è alcun ritardo tra l'irradiazione di un emettitore e l'emissione di fotoelettroni. Ciò è dovuto al fatto che il fotone interagendo con l'elettrone gli cede tutta la sua energia senza ritardi temporali. Inoltre ad una data frequenza il numero di fotoelettroni emessi per secondo è proporzionale all'intensità della radiazione incidente. Infine i fotoelettroni hanno energia cinetica con valori compresi tra zero e un massimo ben definito, proporzionale alla frequenza della radiazione incidente e indipendente dall'intensità. L'energia cinetica degli elettroni liberi risulterà pertanto uguale o inferiore a un massimo dato dalla differenza hf-E_L (valore che deve risultare necessariamente positivo perchè l'elettrone possa liberarsi dal materiale). Si definisce inoltre efficienza quantica il numero di elettroni emessi per ogni fotone incidente. L'efficienza quantica dipende naturalmente dal tipo di metallo e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Nei **sensori fotoemissivi** purtroppo l'effetto della temperatura non è trascurabile in quanto il valore della soglia fotoelettrica non è più ben definito quando la temperatura del metallo si scosta dallo zero assoluto. Vi sono dei **coefficienti di correzione** dell'effetto di temperatura proposti da *Fowler* e da *De Bridge*. Per sfruttare la fotoemissione si potrebbero utilizzare anche dei semiconduttori, ma a questi sono preferiti i **metalli** che presentano un'energia di soglia fotoelettrica inferiore a quella dei semiconduttori. I rivelatori fotoemissivi trovano scarsa utilizzazione nei sensori, mentre più diffusa è l'applicazione nei **fotomoltiplicatori** nei quali si crea una corrente elettrica incrementando l'effetto fotoelettrico mediante una serie di elettrodi secondari.

L'**effetto fotoconduttivo** determina un passaggio di corrente elettrica in materiali investiti da radiazioni di varia lunghezza d'onda. Esso è dovuto alla variazione delle caratteristiche elettriche nel materiale investito dalla radiazione, in particolare della conduttività per quanto riguarda materiali isolanti e semiconduttori. Il fenomeno prende anche il nome di **effetto fotoelettrico interno** per distinguerlo da quello esterno che attiene alla fotoemissione.

La radiazione incidente consente il passaggio degli elettroni da uno stato di legame a uno libero. Gli elettroni liberi non hanno energia sufficiente per uscire dal materiale (come avviene nel caso della fotoemissione) ma contribuiscono alla conduzione facendo diminuire la resistività del materiale, ovvero aumentare la conduttività. In questo tipo di fenomeno, per avere un flusso di corrente elettrica, variabile con la radiazione incidente,

è necessario collegare l'elemento fotoconduttivo a un generatore di tensione elettrica, dando quindi luogo a sensori passivi.

Tra i materiali fotoconduttivi si annoverano anche i materiali semiconduttori, nei quali, come è noto, vi è una separazione fisica dei portatori di carica. Per questi materiali è necessario fare una distinzione. Vi è un **effetto fotovoltaico** (che sarà esaminato in seguito) in cui senza un apporto di energia dall'esterno del materiale si ha il verificarsi di una d.d.p. per il passaggio di elettroni dalla banda di valenza (BV) a quella di conduzione (BC); l'effetto fotoconduttivo invece comporta semplicemente una variazione di conduttività nel materiale, per quantificare la quale occorre un apporto di energia dall'esterno. La conduttività in un materiale semiconduttore è data da $\sigma = Ne\mu$, dove N è il numero totale di elettroni in BC, e è la carica dell'elettrone e μ la mobilità dei portatori di carica.

Purtroppo anche l'effetto fotoconduttivo è influenzato dall'*effetto termico*. Infatti il numero N di elettroni in BC è fortemente influenzato dalla temperatura in accordo alla formula seguente: $N=N_0 exp(-E_g/2kt)$, dove N_O è il numero totale di elettroni nel materiale (cioè in banda di conduzione, BC, e banda di valenza, BV), E_g è il *gap* di energia tra le due bande, k è la *costante di Boltzmann* e T è la temperatura della giunzione. N quindi aumenta con T ed è zero allo zero assoluto.

Un altro fenomeno che riduce l'entità dell'effetto fotoconduttivo è il tempo di vita limitato degli elettroni in BC, mentre sarebbe auspicabile che esso fosse più lungo possibile per aumentare la sensibilità. Per un calcolo della corrente di fotoconduzione si può considerare un cubo di germanio avente lo spigolo di 1 cm con due elettrodi, necessari per creare il campo elettrico, posti su due facce opposte. Se N_F sono i fotoni assorbiti in un secondo, il numero di elettroni e lacune liberi in eccesso raggiunge una concentrazione costante $N_F t$ per ciascun tipo di carica. Il numero di elettroni N_e che fluiscono nel tempo t attraverso la batteria nel circuito esterno è dato da: $N_e = V N_F t (\mu_e + \mu_b)$, dove V è la tensione applicata e μ_e e μ_b sono le mobilità di elettroni e lacune rispettivamente.

L'effetto fotoconduttivo si presenta in molti materiali come gli **alogenuri alcalini**, il **germanio**, il **solfuro di cadmio**, il **seleniuro di cadmio**, il **solfuro di piombo**, il **seleniuro di piombo**. L'entità dell'effetto nei diversi materiali fotoconduttivi e quindi la sensibilità del sensore che utilizzi un determinato materiale variano con la lunghezza d'onda della radiazione incidente. Pertanto si assegna a ciascun materiale fotoconduttivo un particolare campo di frequenze, compreso nella banda fondamentale di assorbimento ottico, nel quale si manifesta la sua migliore attitudine. Ad esempio gli **alogenuri alcalini** sono particolarmente indicati nella **regione rossa dello spettro** (avendo un picco di assorbimento ottico nell'intorno di 1,6 eV), mentre il **germanio** è indicato per radiazioni nell'**infrarosso** (avendo massimo assorbimento ottico intorno a 0,7 eV), ma può essere utilizzato anche nel visibile e nell'ultravioletto. Le proprietà di conduttività dei fotoconduttori sono notevolmente migliorate con il **drogaggio** consistente nell'introduzione di una quantità controllata di impurezze. Il fotoconduttore è di solito preparato sotto forma di sottile pellicola, per evaporazione del materiale sotto vuoto, per precipitazione chimica o per compressione del materiale polverizzato. Le celle di solfuro di cadmio sono molto usate per applicazioni industriali, per la loro alta sensibilità nello spettro visibile. Tuttavia esse presentano errori di isteresi (la risposta dipende dalla esposizione alla luce avvenuta in precedenza) e di piedistallo (presenza di correnti nel circuito anche in assenza di luce). Le celle di **solfuro di piombo** e **seleniuro di piombo** sono particolarmente sensibili alla radiazione infrarossa e la sensibilità aumenta alle

basse temperature con il crescere delle lunghezze d'onda delle radiazioni. Per utilizzarle nel lontano infrarosso è necessario raffreddare le celle con idrogeno liquido (si portano a temperature intorno a -250°C). Le celle fotoconduttrici sono caratterizzate dalla loro sensibilità nell'infrarosso (λ= 1- 2 μm) e dal loro breve tempo di risposta. Il loro utilizzo si ha nei sistemi di **registrazione** ad alta velocità, nei **microscopi** ad alta risoluzione, nell'**elettrografia** e nei **rivelatori di radiazioni infrarosse.**

La **fotoionizzazione** è un effetto che consente di produrre in un gas la ionizzazione per azione di una radiazione elettromagnetica. La ionizzazione consiste nella modificazione di una molecola o di un atomo neutro in uno ione positivo o in un elettrone libero. In casi più complessi una molecola può essere modificata in uno ione positivo o in uno negativo, separati tra loro. L'energia necessaria perché possa manifestarsi il processo di fotoionizzazione è fornita per irraggiamento di fotoni contenuti in radiazioni X od ottiche. Tali radiazioni agiscono in genere in un gas, ma possono anche essere applicate alla superficie di materiali solidi e danno luogo ad atomi ionizzati o a elettroni liberi. La fotoionizzazione è utilizzata nel campo della misura delle radiazioni.

I due effetti precedenti danno luogo a sensori passivi, mentre quello **fotovoltaico** è riferito a sensori attivi ed è conseguente alla conversione dell'energia radiante in energia elettrica. Tale effetto consente la realizzazione di **celle solari**, notissime per la loro utilizzazione sempre più diffusa in diversi campi, come quello dei satelliti.

L'effetto fotovoltaico si presenta nelle giunzioni p-n dei semiconduttori, sottoposte a radiazioni che danno luogo alla comparsa di una forza elettromotrice (f.e.m.). Come mostrato in Fig. 4.2, illuminando la giunzione si producono coppie elettroni-lacune; le coppie vengono separate dal campo della barriera (gap) e danno origine a una f.e.m.. La giunzione p-n altri non è che un diodo caratterizzato da una elevata corrente inversa. Naturalmente si vengono a creare una lacuna o buca in BV ed un elettrone in BC, solo se l'energia *hf* del fotone è superiore a quella E_g caratterizzante la barriera di potenziale tra le due bande. La lacuna e l'elettrone liberati si muovono liberamente nelle due bande e possono fluire nel circuito esterno. È opportuno notare che la direzione della corrente è la stessa della corrente inversa in un diodo normale.

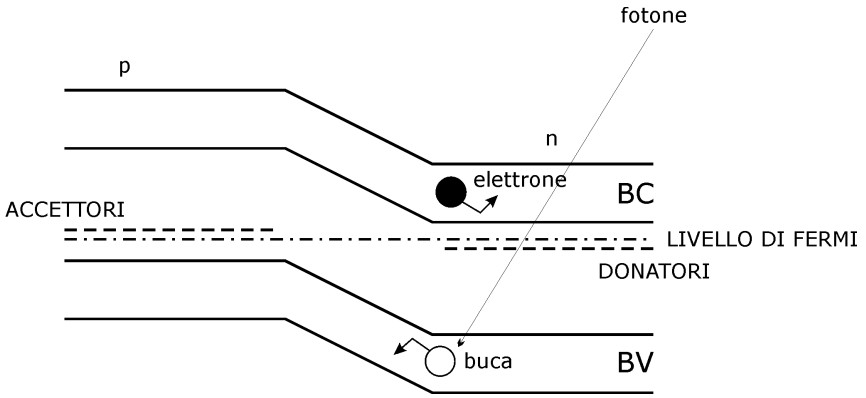

Figura 4.2 - Effetto fotovoltaico in una giunzione p-n

Così la corrente I_L, dovuta alla radiazione luminosa, può considerarsi, come mostra la Fig. 4.3, una grandezza che determina un aumento della corrente inversa. Quindi in

condizioni di cortocircuito all'esterno fluirà una corrente I_L, mentre in condizioni a vuoto ai morsetti AB si avrà una tensione V_0. Nel circuito equivalente sono presenti oltre al generatore di corrente I_L, una resistenza R_d (che limita la corrente di cortocircuito) e una capacità C (che può limitare la risposta in frequenza). L'entità della corrente I_L è una funzione dell'energia W associata alla radiazione e della frequenza f della radiazione monocromatica. Il numero di fotoni al secondo è dato da W/hf per cui: $I_L = keW/hf$, dove k è un fattore di efficienza del materiale utilizzato per il diodo. Materiali tipici per la costruzione delle giunzioni nelle celle fotovoltaiche sono: silicio-(borato di silicio); selenio-ferro; rame-(ossido di rame). La misura della radiazione incidente può avvenire attraverso la misura della corrente I_L. Celle fotovoltaiche sono usate anche nei *rivelatori di particelle*, in particolare per i raggi γ e hanno trovato applicazione nelle ricerche sui raggi cosmici compiute con i satelliti.

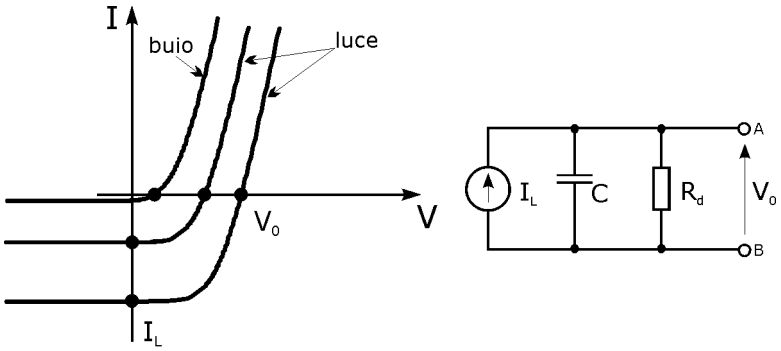

Figura 4.3 - Caratteristica e circuito equivalente di un diodo fotovoltaico

Fotodiodi e **fototransistor** sono elementi fotovoltaici nei quali l'altezza della barriera di potenziale in corrispondenza della giunzione è modulata dalla luce incidente. Nei fotodiodi per aumentare la sensibilità si effettua una polarizzazione inversa che fa circolare una corrente piccola al buio, crescente con la quantità di luce incidente sul fotodiodo. I fototransistor sono diversi dai fotodiodi perché la corrente fotoelettrica è amplificata con un notevole aumento della sensibilità alla radiazione incidente. Alcuni tipi di fototransistor sono usati come interruttori o dispositivi bistabili. Piccole quantità di luce sono in grado di produrre la commutazione del circuito dalla condizione di minima corrente a quella di corrente elevata.

4.2 - Effetto Doppler

Questo effetto fu scoperto nel 1842 dal tedesco *C. Doppler* e consiste nella variazione di frequenza delle onde acustiche, ottiche, radio, dovuta al moto relativo tra sorgente e ricevitore delle onde. Occorre distinguere gli aspetti salienti del fenomeno nel campo *acustico* e in quello *ottico* in quanto si presentano alcune differenze.

Nel *campo acustico* l'effetto è facilmente percepibile quando una tromba attivata di una autoambulanza si avvicini ad un ascoltatore fermo. Anche se l'intensità e la frequenza dell'onda sonora emessa dalla tromba restano costanti, l'ascoltatore percepirà l'avvicinarsi o l'allontanarsi dell'autoambulanza perché aumenterà o diminuirà la frequenza dell'onda sonora (numero di suoni nell'unità di tempo) che giunge al suo orec-

chio. Quando, come in genere accade, la velocità, v_u, di propagazione del suono è molto più grande della velocità, v_r, del moto relativo tra sorgente e ricevitore, la **variazione di frequenza** tra la frequenza, f_s, dell'onda emessa dalla sorgente e quella dell'onda percepita dal ricevitore risulta:

$$\Delta f = f_s \frac{v_r}{v_u}$$

Se il moto non avviene lungo la retta di congiunzione della sorgente e del ricevitore, nella precedente equazione occorre considerare per v_r la componente della velocità secondo la suddetta retta. L'effetto *Doppler* nel campo acustico è quindi un *effetto* tipicamente **longitudinale**, non si presenta quando la direzione del moto è ortogonale alla congiungente sorgente-ricevitore. Nel campo acustico la variabilità della velocità di propagazione delle onde influisce sulla variazione di frequenza Δf, il che non accade nel campo delle onde elettromagnetiche.

L'effetto *Doppler*, **relativo alle onde elettromagnetiche** è molto utilizzato sia in **cosmologia** sia nei **radar**. Se una stella si muove rispetto a un osservatore si ha una variazione nella frequenza delle onde ricevute. Tale variazione dà luogo a una dispersione delle righe spettrali in un ricevitore sincronizzato con le frequenze delle onde emesse dalla stella. Dalla dispersione delle righe spettrali è possibile risalire al moto dei corpi celesti il cui spettro sia rivelabile. L'effetto Doppler nel campo delle onde elettromagnetiche dà luogo a una **variazione di frequenza**, che ha la seguente forma generale:

$$\Delta f = f_s \left[\frac{\sqrt{1-\left(\frac{v_r}{c}\right)^2}}{1-\frac{v_r}{c}\cos\theta} - 1 \right]$$

dove c è la velocità della luce e θ è l'angolo che la congiungente sorgente-ricevitore forma con la direzione del moto. Pertanto nel campo delle onde elettromagnetiche si hanno due effetti:

- **effetto Doppler longitudinale**, nell'equazione precedente $\theta=0$, $v_r << c$, per cui si ha:

$$\Delta f_l = f_s \left[\frac{1}{1-\frac{v_r}{c}} - 1 \right] \cong f_s \frac{v_r}{c}$$

con una variazione di frequenza di segno negativo nel caso di allontanamento della sorgente dal ricevitore;

-effetto Doppler trasversale, nell'equazione generale si deve porre $\theta = \pi/2$, $v_r << c$:

$$\Delta f_t = f_s \left[\sqrt{1 - \left(\frac{v_r}{c} \right)^2} - 1 \right] \cong - \frac{f_s}{2} \left(\frac{v_r}{c} \right)^2$$

Dall'esame delle due equazioni precedenti si evince facilmente che essendo il rapporto v_r/c molto piccolo l'effetto *Doppler* trasversale, proporzionale al quadrato di tale rapporto, è decisamente inferiore a quello longitudinale, proporzionale solo al suddetto rapporto, per cui nei sensori in cui non è richiesta un'accuratezza molto elevata, si trascura l'effetto trasversale quando si presenta insieme con quello longitudinale. Nel caso delle **applicazioni radar** si misura la variazione della frequenza tra un segnale trasmesso e il segnale dell'**eco**, dovuto a un bersaglio mobile. Poiché il trasmettitore e il ricevitore si trovano nella stessa posizione e il segnale ottico va prima dal trasmettitore al bersaglio e poi è riflesso verso il ricevitore, l'effetto longitudinale è doppio rispetto alla situazione precedente, per cui la sua espressione si modifica nel modo seguente:

$$\Delta f_l = 2 f_s \frac{v_r}{c}$$

dove v_r è la velocità relativa del bersaglio nella direzione del radar. La variazione di frequenza è positiva nel caso in cui il bersaglio si avvicini al radar, negativa nel caso si allontani. L'uso più diffuso del radar *Doppler* è quello di misuratore della velocità degli oggetti (**radiotachimetro**), ma applicazioni si hanno anche nei **radiogoniometri**. L'effetto *Doppler* è molto utilizzato anche nei sensori di flusso nei quali si può fare ricorso a onde nel campo degli ultrasuoni, dei radar e dei laser con realizzazioni ben differenti l'una dall'altra.

4.3 - Effetti piezoelettrico, piroelettrico e piezoresistivo

L'**effetto piezoelettrico** dà luogo a una differenza di potenziale (d.d.p.) fra le due facce di particolari cristalli, quando su di esse siano applicate delle sollecitazioni meccaniche. Il fenomeno osservato dai fratelli *Pierre e Jacques Curie* nel 1880 può manifestarsi anche in senso inverso (**reversibilità**). L'effetto piezoelettrico diretto fu riscontrato dai due fratelli *Courie* in diversi cristalli come il clorato di sodio, la boracite, la tormalina, il quarzo, il sale di *Rochelle*.

Si possono presentare deformazioni meccaniche in particolari **cristalli ferroelettrici** sottoposti ad un campo elettrico. Il segno della d.d.p. segue quello della deformazione e viceversa. Utilizzando l'effetto piezoelettrico si realizzano attuatori che convertono una deformazione in cariche elettriche. L'effetto non si verifica in materiali che presentano una distribuzione di cariche simmetriche o meglio che abbiano un centro di simmetria nella struttura cristallina. Fu *Voigt* nel 1910 che scoprì che tra le trentadue **classi cristallografiche** sono ben ventuno quelle che non hanno centro di simmetria e che, a eccezione di una, presentano caratteristiche piezoelettriche.

Nei cristalli non conduttori la piezoelettricità è interpretata come una alterazione dell'equilibrio dei momenti di dipoli elettrici. Quindi una sollecitazione meccanica che provoca una deformazione modifica i momenti di dipolo con conseguente variazione di cariche in superficie dando luogo a una differenza di potenziale. Si possono così realiz-

zare sensori di pressione, di vibrazione e di onde acustiche. La polarizzazione piezoelettrica è legata al processo di orientazione dei dipoli elettrici tendenzialmente nella direzione della forza applicata e non è limitata ad un unico asse, ma in molte classi di cristalli si presenta solo su un unico piano. La relazione matematica tra le sei componenti del tensore degli sforzi (tre componenti per la tensione e tre per la compressione) e le tre componenti del vettore di polarizzazione P è rappresentata da una matrice a 18 elementi piezoelettrici, i cui valori sono funzioni della maggiore o minore simmetria del cristallo. Per semplificare la forma della matrice si scelgono come assi di riferimento quelli di simmetria naturale del cristallo.

La prima applicazione della piezoelettricità è dovuta a *Pierre Curie*, che realizzò un misuratore di cariche elettriche, ma le prime utilizzazioni in campo industriale sono successive e si fanno risalire alle prime decadi del Novecento, quando furono generate onde acustiche con risonatori al quarzo, impiegati come sonar per individuare i sottomarini in immersione. Altre applicazioni riguardano la costruzione di **interferometri acustici** per la misura della velocità del suono e di filtri selettivi impiegati in radiotecnica. Il materiale piezoelettrico più diffuso è il **quarzo**, in virtù delle sue eccellenti caratteristiche, quali l'elevata resistenza allo sforzo meccanico, la possibilità di funzionare a temperature fino a 500 °C, l'ottima linearità, l'isteresi trascurabile, la sensibilità costante in un ampio campo di temperature e la bassissima conducibilità. L'effetto piezoelettrico è presente, come si è accennato a proposito dei microsensori e dei MEMS, anche nel **silicio** e nel **germanio**, oltre che in elementi **piezoceramici**, ed inoltre può essere ottenuto artificialmente nei **materiali ferroelettrici** (come a esempio nel **titanato-zirconato di piombo** e nel **titanato di bario**) riscaldandoli in presenza di intensi campi elettrici. Quando si applichi un campo elettrico ad una lastra di materiale ferroelettrico sinterizzato a temperatura superiore a quella di *Curie* e quindi si abbassi progressivamente la temperatura, mantenendo costante il campo elettrico, si induce all'interno del materiale una microstruttura permanente che presenta effetti piezoelettrici. Come il quarzo, anche i materiali ferroelettrici sono molto utilizzati in quanto presentano un'elevata sensibilità della polarizzazione al campo elettrico esterno e valori di accoppiamento piezoelettrico superiori a quelli relativi agli altri cristalli piezoelettrici, anche se presentano un errore d'isteresi non sempre trascurabile. Altri materiali usati nella realizzazione di sensori piezoelettrici, per la loro sia convenienza economica sia resistenza agli urti, sono quelli polimerici, come ad esempio il fluoruro di polivinildene, in cui si ottengono caratteristiche piezoelettriche permanenti estendendo il materiale quando è sottoposto all'azione di un campo elettrico esterno.

I sensori che impiegano il quarzo consistono essenzialmente in sottili lastre di cristallo tagliate in modo opportuno, rispetto agli assi del cristallo, in dipendenza della specifica applicazione. il quarzo genera una carica di pochi picocoulomb che è proporzionale alla forza applicata. Si consideri ora un piccolo disco di quarzo o di altro materiale piezoelettrico, la densità di carica q è funzione della forza applicata F: $q=k_qF$, dove k_q è la sensibilità alla carica elettrica o coulombiana e risulta pari a $2\ 10^{-12}$ C/N per il quarzo e a circa $150\ 10^{-12}$ C/N per il titanato-zirconato di piombo. Le superfici sulle quali agiscono le forze applicate al materiale sono metallizzate e danno luogo a un condensatore di capacità $C=\varepsilon_r\varepsilon_O A/s$ dove ε_r è la permettività o costante dielettrica relativa, pari circa a 4,5 per il quarzo e a 1800 per il titanato-zirconato di piombo, ε_O è la permettività del vuoto pari a $(1/36\pi)10^{-19}$ F/m, A è l'area della superficie metallizzata ed s è lo spessore del disco. La d.d.p. V corrispondente alla carica è proporzionale alla pressione, $p=F/A$, applicata secondo la relazione:

$$V = \frac{q}{C} = k_q \frac{sF}{A\varepsilon_0\varepsilon_r} = k_V sp$$

dove $k_V = k_q/\varepsilon_O\varepsilon_r$ è la sensibilità voltmetrica, che ha un valore di circa 5 10^{-2} Vm/N per il quarzo e di circa 10^{-2} Vm/N per il titanato zirconato di piombo. La conversione della carica elettrica in tensione elettrica avviene attraverso un semplice convertitore elettronico. La sensibilità voltmetrica può essere facilmente migliorata impiegando un amplificatore. L'uso di questi dispositivi elettronici, che hanno bisogno di un'alimentazione esterna, toglie però al sensore piezoelettrico la caratteristica di essere attivo. La tensione in uscita al sensore è proporzionale oltre che alla sensibilità voltmetrica e alla pressione applicata anche allo spessore della piastrina del materiale piezoelettrico, per cui spesso per aumentare la sensibilità del sensore si sovrappongono tre piastrine uguali e si sommano le tre tensioni elettriche in uscita a ciascuna di esse.

I **sensori piezoelettrici** sono ampiamente utilizzati per misure di **forza** e **pressioni**, ma è opportuno sottolineare che la risposta alla deformazione non si estende alla componente continua, a causa della capacità *C*. L'effetto piezoelettrico è anche impiegato per **misure accelerometriche** per la conversione di segnali meccanici o acustici in segnali elettrici in microfoni, pick-up per giradischi, misuratori di rugosità.

Tra i cristalli piezoelettrici ve ne sono alcuni, in particolare quelli appartenenti a dieci delle 32 classi cristalline, che presentano un unico asse di polarizzazione, ovvero una direzione privilegiata per la orientazione dei momenti elettrici delle molecole. Questi cristalli manifestano un ulteriore effetto, detto **piroelettrico**, consistente nella variazione della polarizzazione elettrica spontanea o indotta, che insorge in seguito a variazioni di temperatura dovute ad esempio ad assorbimento di radiazioni.

Il vettore polarizzazione è legato alla variazione di temperatura attraverso una serie di coefficienti piroelettrici, variabili con l'orientazione degli assi di riferimento. Fra i cristalli che presentano il fenomeno vi sono la **tormalina**, l'**acido tartarico**, il **solfato di litio** e **sodio**, il **titanato di bario**, il **titanato-zirconato di piombo**, il **niobato di litio**, con coefficienti piroelettrici variabili intorno a valori di 10^{-13} C/m^{2}K.

L'**effetto piroelettrico** si manifesta in due modi, uno **primario**, quando il cristallo è tenuto a volume costante in modo che non si verifichino fenomeni di dilatazione termica, e uno **secondario**, quando non si esercitano azioni meccaniche e si possono quindi verificare deformazioni per la dilatazione termica. Nel secondo caso l'effetto piezoelettrico, dovuto alla dilatazione, fornisce un ulteriore contributo alla variazione dei momenti di dipolo. I coefficienti piroelettrici variano in funzione di T^2 (con T temperatura assoluta) per l'effetto primario e con T^4 per l'effetto secondario, a indicare che l'effetto secondario è maggiore di quello primario.

L'effetto piroelettrico è ampiamente sfruttato nei **bolometri**, ovvero nei **rivelatori termici di radiazioni**, e specie nel campo delle **radiazioni infrarosse** questi sono preferiti a quelli basati sull'effetto fotoelettrico o fotoconduttivo, per il pregio di poter funzionare anche a temperatura ambiente, senza necessità di correzioni, essendo insensibili alla radiazione di fondo stazionaria nel tempo, in quanto se l'illuminamento è costante si portano in equilibrio termico e il segnale in uscita si azzera. Essi inoltre, come tutti i sensori termici, hanno un'ampia banda passante ovvero una sensibilità spettrale praticamente piatta, in un intervallo di frequenze limitato solo dalle caratteristiche delle lenti ottiche di protezione utilizzate. Nei rivelatori termici di radiazione basati sull'effetto piroelettrico la radiazione è diretta su un piccolo disco di materiale le cui facce sono metallizzate e sulle quali si manifesta una tensione elettrica. Il sensore piroelettrico si può

considerare, in modo analogo al piezoelettrico, un condensatore sulle cui armature si addensano cariche indotte dal dielettrico polarizzato. Quando la temperatura del sensore varia anche la polarizzazione e le cariche sul condensatore variano, producendo una debole corrente, che al solito può essere convertita in tensione mediante un amplificatore operazionale con elevata resistenza di retroazione. È quasi sempre necessario amplificare il segnale che deve essere applicato ad una impedenza molto elevata. A tale scopo il cristallo piroelettrico è collegato con un amplificatore MOS-FET, che notoriamente presenta impedenze di ingresso superiori anche alle decine di megaohm, in modo da assorbire una minima frazione della corrente generata dal sensore piroelettrico montato sullo stesso supporto. Anche l'effetto piroelettrico come quello piezoelettrico gode di **reversibilità**, ovvero si può presentare un **effetto detto elettrocalorico** lineare. Quando si ha una variazione della polarizzazione a causa della applicazione di un campo elettrico esterno, il cristallo subisce una variazione di temperatura. I valori di questa variazione raggiungibili in tipici materiali piroelettrici sono dell'ordine di grandezza di 0,01 °C.

L'**effetto piezoresistivo** fu scoperto da Lord Kelvin nel 1856. È l'effetto di **variazione della resistività** di un opportuno materiale quando è soggetto a una deformazione, dovuta a uno sforzo ad esso applicato. L'effetto è correntemente utilizzato nei sensori estensimetrici (*strain-gage*). Nei **materiali metallici** l'effetto si manifesta in modo ridotto rispetto ai semiconduttori. Fu nel 1954 che si scoprì la caratteristica di alcuni materiali semiconduttori di presentare un effetto piezoresistivo molto maggiore dei metalli. I cristalli di semiconduttori dai quali si ottengono gli elementi sensibili dei sensori sono in genere opportunamente drogati e il contenuto di impurità deve essere accuratamente controllato perché si abbiano le caratteristiche desiderate. Con l'uso di semiconduttori si ottengono notevoli vantaggi quali: una elevata sensibilità (superiore quasi di cento volte a quelle relative agli estensimetri metallici); piccole dimensioni (0,5x0,25 mm); un elevato valore di resistenza (da 60 Ω a 1 kΩ); un elevato numero di cicli (superiore a 10^7); piccola isteresi. I valori di sensibilità indicati stanno a significare che l'effetto piezoresistivo produce nel silicio, a parità di sforzo, una variazione di resistenza maggiore di quasi 2 ordini di grandezza rispetto a quella che si ha nei metalli. Ad esempio, se il sensore fosse soggetto ad un allungamento unitario per trazione dello 0,1%, la sua variazione di resistenza per un metallo sarebbe intorno allo 0,2%, mentre la resistenza del silicio cambierebbe di circa il 10%. Sfortunatamente i semiconduttori hanno anche un elevato coefficiente di temperatura (effetto termoresistivo) per cui il loro uso negli estensimetri richiede spesso il ricorso a speciali tecniche di compensazione della temperatura. I sensori piezoresistivi si utilizzano per misurare la pressione, l'accelerazione e la forza. L'effetto piezoresistivo è utilizzato anche nei MEMS negli **accelerometri** e nei **microfoni**. Oggi si fa un uso esteso di sensori di deformazione in campo edile, aeronautico, automobilistico.

Una **variazione di resistenza** conseguente a uno spostamento si può ottenere oltre che con elementi piezoresistivi, anche con materiali conduttori, facendo scorrere una spazzola su un filo o su un reostato come avviene nei **sensori potenziometrici**.

4.4 - Effetti magnetici

La **magnetostrizione** è quel fenomeno fisico che determina variazioni di dimensioni e forma in un materiale magnetico soggetto a magnetizzazione ed è detta anche effetto *Wiedemann.* L'entità del fenomeno dipende dalla direzione in cui agisce il campo e dal grado di magnetizzazione del materiale. Reversibilmente si hanno variazioni nella carat-

teristica di magnetizzazione a causa di deformazioni meccaniche del materiale e l' effetto è denominato **magnetoelastico** o *Villary*.

La magnetostrizione è dovuta alla dipendenza della energia di anisotropia del cristallo dallo stato di deformazione del reticolo cristallino. Nell'effetto **magnetoelastico** sollecitazioni contenute entro il limite di elasticità del materiale possono produrre una diminuzione o un aumento di **permeabilità**, in relazione alla particolare natura del materiale. Ad esempio il **nichel** soggetto a sollecitazioni che producono deformazioni elastiche presenta permeabilità tanto minore quanto più è elevata la sollecitazione, mentre il **permalloy 68** (lega Ni 68%, Fe 32%) ha permeabilità che aumenta trenta volte per sollecitazioni di trazione pari a 11 kg/mm^2, corrispondenti al limite di elasticità, superato questo limite la permeabilità diminuisce rapidamente.

Il nichel è sfruttato nei trasduttori a magnetostrizione, utilizzati per ricezione o trasmissione di vibrazioni sonore ad alta frequenza. Lo stesso fenomeno si sfrutta per misure di **forza**, **pressione**, **accelerazione** utilizzando la variazione di permeabilità di un nucleo di nichel, dovuta alle deformazioni del materiale. Se un intero circuito magnetico o una sua parte è di materiale magnetostrittivo, le variazioni di permeabilità che si producono per sollecitazioni meccaniche del circuito magnetico danno luogo a variazioni dell'induttanza di bobine avvolgenti il nucleo.

Nei sensori di posizione più recenti si impiegano speciali leghe metalliche e si sfrutta l'effetto *Wiedemann*. In alcuni di essi l'elemento, la cui posizione è variabile, è solidale con un magnete permanente, che produce un campo magnetico longitudinale, cui è sottoposto il materiale ferromagnetico, nel quale si verifica l'effetto magnetostrittivo. La barra di materiale ferromagnetico è ferma ed è attraversata da impulsi di corrente, che variano le loro caratteristiche in dipendenza della posizione del magnete permanente mobile rispetto alla barra. Dalla elaborazione delle informazioni contenute negli impulsi di corrente si risale alla posizione dell'elemento mobile. L'assenza di contatto tra il magnete permanente di posizione e l'elemento sensibile, costituito dal materiale ferromagnetico, rende minima l'usura, caratteristica precipua della maggior parte dei sensori basati sugli effetti magnetici.

Gli **effetti galvanomagnetici** si presentano in alcuni materiali quando siano posti in un campo magnetico e siano percorsi da corrente elettrica. Il fenomeno è dovuto sostanzialmente al fatto che gli elettroni che si muovono all'interno del materiale per la circolazione della corrente elettrica sono deviati per effetto del campo magnetico cui sono sottoposti. L'entità di questa deviazione è condizionata dalla struttura cristallina reticolare del solido e può determinare variazioni della **conducibilità elettrica** e la comparsa di un campo elettrico in direzione ortogonale a quella del flusso primario. L'effetto inoltre può essere o trasversale (quando si presenti perpendicolarmente sia alla corrente elettrica sia al campo magnetico) e in tal caso risulta di maggiore interesse, o longitudinale (quando si presenti nella stessa direzione della corrente elettrica).

Gli effetti galvanomagnetici hanno molta analogia con quelli **termomagnetici** che si verificano quando un flusso di calore attraversa un materiale solido immerso in un campo magnetico. La variazione di conducibilità in un materiale conduttore o semiconduttore quando è percorso da corrente ed è soggetto a un campo magnetico H è dovuta all'**effetto magnetoresistivo** che si presenta con la direzione del campo magnetico sia parallela sia trasversale alla direzione in cui fluisce la corrente. La conseguente variazione di resistenza può essere proporzionale al quadrato dell'intensità del campo magnetico per campi deboli, mentre varia linearmente con H per i valori più intensi del campo. L'effetto magnetoresistivo si manifesta sia nei metalli e in leghe di metalli nobili, sia nei semiconduttori in cui è utilizzato per determinare la struttura delle bande. Una delle applica-

zioni dei sensori magnetoresistivi è quella di rivelatore del campo magnetico terrestre o bussola, che può essere utilizzata all'interno dei ricevitori GPS (*Global Positioning System*). La bussola permette al GPS sia di stabilire la direzione in cui si sposta, sia di fornire informazioni utili alla guida anche in assenza di segnale satellitare, come avviene ad esempio nelle gallerie.

L'applicazione attualmente più diffusa dei sensori magnetoresistivi è quella nelle testine di lettura e scrittura dei dischi rigidi, che sono di alluminio o vetro rivestiti di materiale ferromagnetico e dove sono disponili su film sottili le tracce su cui sono memorizzati i dati. Nel sensore magnetoresistivo di lettura, costituito, per esempio, da una lega nichel ferro e da una o più testine leggerissime e velocissime che sfiorano la superficie del disco a distanza di frazioni di micron, due contatti galvanici, per ogni testina, conducono la corrente di polarizzazione e rivelano le variazioni di resistenza causate dalle tracce sul disco. In base al verso del campo magnetico che caratterizza la zona della traccia sulla quale è posizionato l'elemento sensibile, questo varierà la sua resistenza da un valore elevato ad uno basso. Si fa circolare nel sensore una corrente costante in modo che a resistenza alta corrisponda un segnale di tensione alto, equivalente al livello 1 e a resistenza bassa un segnale di tensione basso, equivalente al livello 0. Si utilizzano particolari tecniche per la linearizzazione della curva di taratura del sensore. Nonostante le tensioni in uscita dal sensore siano opportunamente amplificate, le dimensioni delle testine non possono essere ridotte oltre certi limiti, che definiscono la soglia minima di sensibilità e di SNR per una sicura distinzione tra i livelli 1 e 0. Una testina di scrittura ha invece il compito di trasferire l'informazione sulle tracce del disco magnetizzandole, mediante un polo magnetico, in due versi opposti, caratteristici dei livelli 1 e 0. L'avvento della tecnologia MEMS sta permettendo la realizzazione di dischi rigidi di piccole dimensioni, tali da poter essere inseriti all'interno di dispositivi portatili.

Sensori per misure di intensità di corrente o di campo magnetico potrebbero utilizzare l'effetto magnetoresistivo, ma in genere per tali sensori si preferisce attualmente sfruttare l'effetto galvanomagnetico più conosciuto che è quello *Hall*.

L'**effetto *Hall*** fu scoperto da *Edwin Hall* nel 1879. In un materiale conduttore sottoposto a un campo di induzione magnetica B_z normale al flusso di una corrente elettrica di intensità I_x, si manifesta una d.d.p. V_y in direzione perpendicolare alle direzioni sia di B_z sia di I_x, come mostrato in Fig. 4.5. Il fenomeno è dovuto al fatto che le cariche elettriche, in movimento per la presenza della corrente I_x, si accumulano su una faccia del materiale per effetto del campo magnetico, finché si determina un campo elettrico E_y che dà luogo a una forza agente sugli elettroni tale da opporsi e compensare la forza dovuta al campo magnetico. Il campo elettrico E_y (***campo di Hall***), che è legato alla tensione V_y (***tensione di Hall***) dalla relazione $E_y = V_y / d$, è proporzionale al prodotto della corrente e della induzione ovvero al prodotto delle cause che lo hanno determinato. Il segno della tensione di *Hall* che si manifesta su due facce opposte del materiale dipende dalla direzione del campo magnetico, da quello della corrente e dal segno delle cariche elettriche.

L'effetto *Hall* può essere spiegato mediante la teoria degli elettroni liberi. Sia v_x la velocità media di spostamento degli elettroni lungo la direzione *x*. Ogni elettrone sarà soggetto nel piano *xy* alla forza di *Lorentz* che è generata sia dal campo di *Hall*, sia dal campo magnetico agente normalmente al piano *xy*.

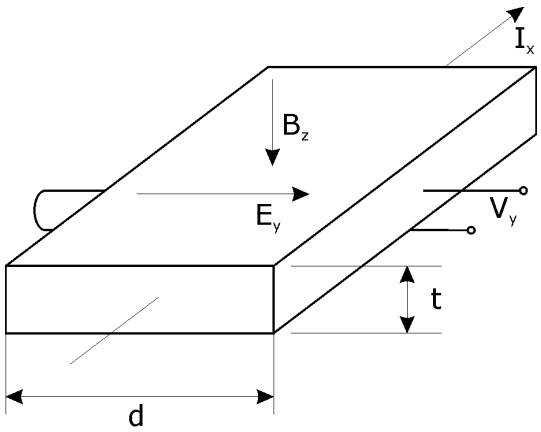

Figura 4.4 - Effetto Hall

Come si è detto questa forza tende ad annullarsi, in quanto l'effetto dei due campi è opposto: $F_L = e\,(E_y - v_x B_z) = 0$, dove e è la carica dell'elettrone. Ricordando che la velocità degli elettroni si può esprimere mediante il prodotto della mobilità μ_x per il campo elettrico nella direzione x, dall'equazione precedente si ricava la seguente espressione: $E_y = v_x B_z = \mu_x E_x B_z$. Poiché il campo elettrico è legato alla densità di corrente attraverso la resistività ρ del materiale, l'espressione precedente può scriversi in funzione di tale densità e da essa ricavare la tensione di *Hall*:

$$E_y = \mu_x \rho J_x B_z = \mu_x \rho \frac{I_x}{td} B_z \quad ; \quad V_y = E_y d = \mu_x \rho \frac{I_x}{t} B_z = k_H \frac{I_x}{t} B_z$$

con t spessore della lamina di materiale e $k_H = \mu_x \rho$ *coefficiente di Hall*. Risultato analogo si sarebbe ottenuto risolvendo l'equazione del trasporto di *Boltzmann*.

La tensione di *Hall* può essere prelevata con opportuni elettrodi. Essa è estremamente bassa nei conduttori e negli isolanti. Infatti il coefficiente di *Hall* dipende dal prodotto della mobilità dei portatori di carica e della resistività del materiale, nei materiali conduttori si ha una bassa resistività, nei materiali isolanti si ha una bassa mobilità. L'effetto *Hall* assume valori tali da consentirne la realizzazione pratica nei semiconduttori, fra i quali sono particolarmente usati l'arseniuro di indio e l'arseniuro di gallio. Poiché la tensione *Hall* è inversamente proporzionale allo spessore della striscia di materiale utilizzato, si impiegano strisce molto sottili, talvolta ottenute per evaporazione in spessori dell'ordine di 1 μm.

L'effetto *Hall* può essere influenzato dalla temperatura, specie in presenza di correnti continue, a causa dell'***effetto Ettingshausen***, che consiste nell'insorgere di un gradiente di temperatura nella stessa direzione del campo elettrico di *Hall*. È bene sottolineare che quando la corrente I_x è alternata il gradiente di temperatura è meno significativo del caso di correnti continue. I sensori ad effetto *Hall* possono essere con segnale in uscita sia analogico sia digitale. Le applicazioni dei sensori analogici ad

effetto *Hall* si hanno prevalentemente nei misuratori di **campo magnetico**, di **corrente elettrica** e di **potenza elettrica**. Da queste misure si può naturalmente risalire a grandezze ad esempio meccaniche legate alle grandezze elettriche da determinate relazioni funzionali. Un dispositivo commerciale che utilizza **arseniuro di indio** ha una corrente di controllo di 0,1 A e presenta una tensione di *Hall* pari a 0,15 V in corrispondenza di un campo di induzione magnetica di 1 Wb/m^2. Un'altra applicazione dei sensori analogici è quella di misurare deboli **correnti continue** che sono convertite, applicando un campo magnetico alternativo, in tensioni *Hall* alternate, più facilmente amplificabili. Vi sono applicazioni di wattmetri ad effetto *Hall* nel campo delle alte frequenze. Proprio la prerogativa di funzionare in un'ampia banda di frequenze ha permesso lo sviluppo dei sensori ad effetto *Hall* nei **trasformatori di correnti alternate e continue** e nei **trasformatori di tensione**. Nei sensori digitali ad effetto *Hall* la tensione in uscita è applicata ad uno squadratore elettronico, che fornisce in uscita due soli livelli di tensione, uno alto, quando la tensione di *Hall* supera il valore di una soglia predefinita, e uno basso, quando la tensione di *Hall* scende al di sotto di un'altra soglia. La differenza tra le due soglie definisce l'immunità al rumore dello squadratore. Un'applicazione si ha negli *encoder*, esaminati nel paragrafo 1.2, dove magneti permanenti e sensori ad effetto *Hall* sostituiscono le funzioni dei LED e PIN. Un'altra applicazione si ha nei sensori di velocità angolare o tachimetri, dove un magnete permanente solidale con l'organo in rotazione induce una tensione di Hall ogni volta che incontra il sensore posto in posizione fissa rispetto al magnete rotante. In tal modo il numero di giri è convertito in un treno d'impulsi di frequenza tanto maggiore quanto più alta è la velocità di rotazione. Utilizzando un semplice contatore digitale d'impulsi si può facilmente risalire alla velocità. Questo sensore è applicato per esempio su alcune biciclette, dove il magnete è solidale con la ruota e il sensore di Hall è fisso sul telaio. Noto il raggio della ruota e quindi la sua circonferenza è possibile misurare oltre alla velocità anche la distanza percorsa.

Gli effetti dell'interazione di un campo elettrico con uno magnetico sono molti e molti sensori ne sfruttano diversi di questi. Altri due di questi effetti che danno luogo a svariate applicazioni sensoristiche sono: la **legge d'induzione** di ***Faraday***; le **variazioni di una induttanza** in una bobina avvolta su un circuito magnetico perturbato. La **legge di induzione di Faraday** stabilisce che quando una bobina di *n* spire è soggetta a un flusso magnetico variabile nel tempo, che si concateni con le sue spire, si induce in essa una f.e.m. la cui espressione è la seguente:

$$e = -n\frac{d\phi}{dt}$$

Questa legge è del tutto generale, nel senso che è valida qualunque sia la causa determinante la variazione del flusso concatenato, e può essere utilizzata nei sensori di campi magnetici variabili nel tempo. In tal caso il sensore o sonda è costituito dalla bobina di *n* spire ferma. Quando invece si vogliano misurare campi magnetici statici occorre far ruotare la bobina a una velocità nota, ma in tal caso l'effetto si dice elettrodinamico. L'**induttanza** di una bobina di *n* spire avvolte su materiale magnetico varia in dipendenza non solo delle *n* spire, ma anche della riluttanza del circuito magnetico. Se questo è dotato di un traferro si può facilmente variare la riluttanza modificando le caratteristiche del circuito magnetico stesso. Dalle variazioni di induttanza si può risalire a **spostamenti**, **deformazioni**, **forze**, **pressioni**. Tra gli **effetti elettromagnetici** si anno-

verano anche quelli **elettrodinamici**. Quando un conduttore di lunghezza l si muove con velocità v, perpendicolarmente a un campo magnetico di induzione B è facile verificare che si manifesta una f.e.m. data da: $e = B\,l\,v$.

In modo reversibile quando il conduttore è attraversato da corrente elettrica i e perpendicolarmente agisca un campo magnetico di induzione B si genera una forza F data da: $F = B\,l\,i$.

La presenza nelle due formule precedenti del prodotto Bl è molto utile per la taratura dei cosiddetti **sensori a equipaggio mobile** che operano con un campo magnetico generato da un **magnete permanente**.

Sugli effetti elettrodinamici (alla base del funzionamento delle macchine elettriche) si basano alcuni **sensori tachimetrici** e i **microfoni elettrodinamici**.

4.5 - Effetti termici

Tra gli effetti termoelettrici quello più noto è l'**effetto *Seebeck***, scoperto nel 1826, che consiste nel manifestarsi di una forza elettro motrice (f.e.m.) in un circuito comprendente due metalli diversi, quando le giunzioni fra questi sono poste a differenti temperature, come mostrato in Fig. 4.5. L'effetto è sfruttato nelle termocoppie ed è dovuto sia alla equalizzazione dei livelli di ***Fermi*** che si verifica quando due metalli sono posti in contatto tra loro sia alla differente diffusione termica di elettroni tra la parte calda e fredda della termocoppia. Quando due metalli con diversi livelli di *Fermi* sono posti a contatto, il livello massimo di energia disponibile per gli elettroni dei due metalli è il livello di *Fermi* più alto. Si determina quindi una f.e.m. proporzionale alla differenza dei due livelli di *Fermi* dipendente dalla temperatura delle due giunzioni.

In prima approssimazione e per differenze di temperatura non molto elevate si può ritenere la f.e.m., e, una funzione (generalmente crescente) della differenza di temperatura fra le due giunzioni (una trattazione più dettagliata sarà fatta quando si esamineranno i sensori a termocoppia nella seconda parte di questo quaderno): $e = k_T\,\Delta T$, dove ΔT è la variazione di temperatura fra le giunzioni e k_T è il **potere termoelettrico** o **sensibilità** della termocoppia, a volte indicato anche come **coefficiente assoluto di *Seebeck***, che può essere sia positivo sia negativo. I valori ottenibili di f.e.m. sono molto piccoli, essendo i valori di k_T in genere variabili tra i 10 e i 100 μV/°C. I sensori termoelettrici sono miniaturizzati nei MEMS, dove per aumentare la sensibilità diverse piccole termocoppie, in genere di alluminio e polisilicio, sono collegate in serie tra loro a formare una **termopila**. Per valutare il salto termico un'estremità della termocoppia è posizionata al di sopra di un'area termicamente isolata del *chip*, l'altra sul silicio. Una delle applicazioni di questi sensori attiene alle misure dell'intensità di radiazioni incidenti, con particolare riguardo alle radiazioni nell'infrarosso. Quando la radiazione incide sul MEMS l'estremità isolata si riscalda e si porta ad una temperatura superiore a quella posta sul silicio consentendo, dalla misura della f.e.m., conseguente al salto termico, di risalire a quella dell'intensità della radiazione. Un'altra applicazione riguarda la misura di **portata di gas**. Due termopile sono equidistanziate su due lati di una sorgente di calore, al passaggio di gas la parte del *chip*, sede di una termopila, che entra per prima in contatto con il gas, si raffredda, mentre la parte opposta del *chip*, dove è posta la seconda termopila, si riscalda e di conseguenza le due termocoppie misureranno due temperature diverse. La differenza di tensione elettrica misurabile ai loro capi è opportunamente am-

plificata ed è proporzionale alla velocità del gas, da cui si risale alla portata. Un sistema analogo è impiegato per **sensori accelerometrici**.

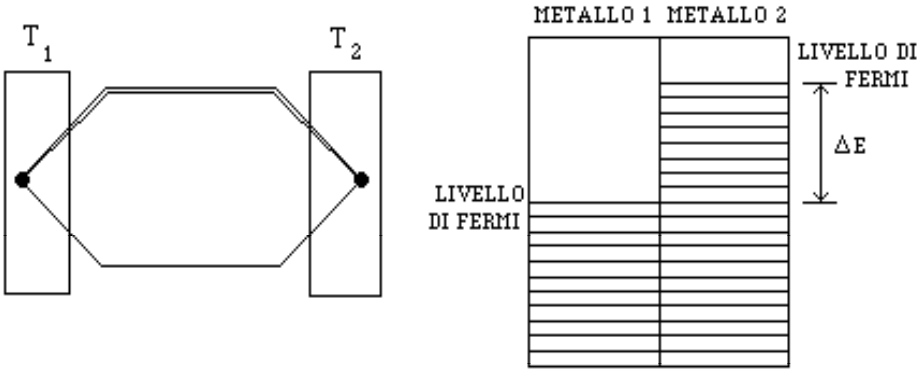

Figura. 4.5 - Termocoppia e livelli di Fermi nei due metalli

Un altro **effetto** termoelettrico è quello ***Peltier***, scoperto nel 1834, che consiste nel manifestarsi di una certa quantità di calore, assorbita o ceduta da una termocoppia quando questa è attraversata da una corrente elettrica. Il calore è assorbito o ceduto in dipendenza della direzione del flusso della corrente elettrica. L'effetto può considerarsi duale dell'effetto *Seebeck*. Si definisce anche un coefficiente relativo di *Peltier*, come il calore che deve essere fornito alla giunzione, in corrispondenza di una densità di corrente unitaria che passi da un conduttore all'altro. Questo effetto è utilizzato nei frigoriferi termoelettrici dove una corrente elettrica di opportuna polarità è inviata in una termocoppia in modo che asporti calore (assorbito da una giunzione della termocoppia). Questi dispositivi sono diffusi soprattutto nel campo del raffreddamento dei sensori che devono funzionare a temperature stabilite, soprattutto per valori di temperatura intorno a 273,15 K (0°C) o leggermente inferiori. La loro caratteristica è quella di avere piccole dimensioni e un limitato assorbimento di potenza (da 15W a 25W). Utilizzando **termopile** si raggiungono temperature anche inferiori con un leggero incremento nella dissipazione di potenza.

Un ultimo **effetto** termoelettrico è quello ***Thomson*** che consiste nello sviluppo di calore in presenza di un gradiente di temperatura in un materiale conduttore, attraversato da corrente elettrica. Esso prende anche il nome di effetto termoelettrico omogeneo, in quanto è l'unico dei tre effetti termoelettrici che riguardi un materiale singolo. Il manifestarsi dell'effetto *Thomson* in una giunzione comporta l'insorgere di una f.e.m. che si sovrappone a quella relativa all'effetto *Seebeck*. L'effetto *Thomson* è relativamente piccolo in una termocoppia rispetto all'effetto *Seebeck*, ma nel caso di misure di temperatura molto accurate deve essere portato in conto mediante un termine correttivo.

Sir **Humphry Davy**, nel 1802 scoprì che la resistenza di un metallo varia con la temperatura. Nel 1826, Sir **William Siemens** suggerì l'utilizzo del platino come elemento in un termometro a resistenza. A loro si deve la scoperta dell'**effetto termoresistivo**. I materiali sia **conduttori** sia **semiconduttori** presentano **variazioni di resistenza elettrica** con le escursioni termiche. Nei sensori di temperatura si utilizzano entrambi i tipi di materiali, benché le loro caratteristiche siano molto differenti.

Nella maggior parte dei materiali la resistività ha una legge di variazione con la temperatura del tipo: $\rho_T=\rho_{Tr}e^{\beta/T}$, dove ρ_T e ρ_{Tr} sono le resistività alle temperature rispettivamente T e T_r con T_r temperatura di riferimento tendente all'infinito e β è una costante proporzionale al *gap* di energia tra la banda di valenza e quella di conduzione.

Nei *materiali metallici* vi è sovrapposizione fra le due bande e in tal caso β risulta molto piccolo e negativo, per cui nell'equazione precedente l'esponenziale può espandersi in fratti semplici. L'espressione della resistività assume la seguente forma polinomiale: $\rho_T=\rho_0(1+\alpha T+\gamma T^2+....)$, dove ρ_0 è la resistività del materiale a 0 °C. Per molti metalli, in campi di temperatura limitati, si può assumere lineare la variazione di ρ con la temperatura: $\rho_T=\rho_0(1+\alpha T)$, dove α è il **coefficiente di temperatura** della resistività del materiale considerato. Se non è noto il valore di ρ_0 si può fare a meno della sua conoscenza, misurando la resistenza del sensore termoresistivo in condizioni di equilibrio termico con l'ambiente a temperatura T_a. Infatti è facile verificare che il legame tra la resistenza del sensore a temperatura T e quella a temperatura T_a è il seguente:

$$R_T = R_{Ta}\frac{1+\alpha T}{1+\alpha T_a}$$

La retta rappresentativa dell'andamento della resistenza in funzione della temperatura ha una pendenza positiva che varia con il materiale conduttore considerato, come mostrato in Fig. 4.6.

Per i *materiali semiconduttori* che presentano un *gap* non nullo tra le bande di valenza e di conduzione, β è positivo e varia con il materiale considerato, assumendo valori elevati, intorno a diverse migliaia. Anche per i materiali semiconduttori si può determinare una legge di variazione della resistenza che prescinda dalla conoscenza di ρ_{Tr}, quando sia noto il valore di resistenza alla temperatura ambiente T_a (normalmente pari a 25 °C), infatti si può facilmente verificare la validità della seguente relazione:

$$R_T = R_{Ta}e^{\beta\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_a}\right)}$$

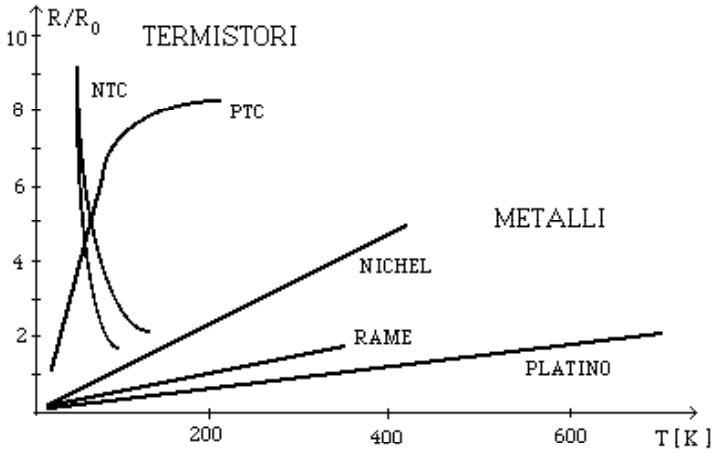

Figura 4.6 - Variazioni indicative della resistenza con la temperatura per metalli e termistori

La resistenza R_{Ta} è comunemente compresa tra 1000 e 200 000 Ω. La variazione di resistenza con la temperatura nei materiali semiconduttori è quindi esponenziale, il che rappresenta uno svantaggio, anche se vi sono tecniche che consentono di linearizzare la risposta dei sensori che fanno uso di materiali semiconduttori. Tra i materiali più utilizzati vi sono gli ossidi di nichel, di cobalto e di manganese. Essi sono noti come **termistori a coefficiente di temperatura negativa** (NTC), in quanto la pendenza della curva è negativa. È possibile ottenere **termistori con coefficienti di temperatura positivi** (PTC) in un campo limitato di temperatura, mediante un opportuno drogaggio, anche se le leggi di variazione della resistenza con la temperatura variano considerevolmente tra i vari termistori PTC. In Fig. 4.6 sono riportati a titolo illustrativo gli andamenti delle leggi di variazione della resistenza con la temperatura per metalli e semiconduttori. Nell'ambito degli effetti termoresistivi si può annoverare anche quello dovuto alle variazioni con la temperatura sia della resistenza diretta di un *diodo*, costituito da una giunzione p-n al silicio, quando sia polarizzato direttamente, sia delle tensioni base-emettitore di dispositivi allo stato solido costituiti da *transistor* con corrente di collettore costante. L'entità delle variazioni sono differenti da dispositivo a dispositivo, per cui ogni termometro richiede una taratura preventiva. Questi sensori si utilizzano nelle applicazioni che non richiedono elevate precisioni soprattutto per la loro linearità nella risposta, il piccolo tempo di risposta e il costo ridotto rispetto ad altri sensori.

4.6 - Effetti capacitivi

Sensori tipicamente passivi possono essere costituiti semplicemente da condensatori, la cui capacità vari con il modificarsi delle caratteristiche fondamentali del condensatore stesso. Ad esempio si consideri un condensatore ad armature piane e parallele di area A,

poste a distanza d tra loro e con interposto un dielettrico di permettività relativa ε_r. La capacità di questo condensatore è data da:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d}$$

dove ε_o è la permettività del vuoto. Dalla precedente risulta evidente che la capacità può variare per modifiche dei parametri dimensionali o della permettività relativa del dielettrico. Si ottengono così tre tipi base di sensori capacitivi: a **variazione di distanza** fra le armature; a **variazione di area** delle armature; a **variazione di permettività**.

La variazione di distanza può avvenire per deformazione delle armature quando si è in presenza di dielettrici gassosi o liquidi o per applicazione di pressioni sia statiche sia dinamiche. La variazione di area si può avere sia per scorrimento sia per rotazione di una armatura rispetto all'altra. La variazione di **permettività** può essere dovuta a variazioni sia di temperatura (**effetto termodielettrico**) sia di composizione del dielettrico. L'effetto termodielettrico è utilizzato nei sensori capacitivi di **temperatura**. Come dielettrici si impiegano vetri e ceramiche metallizzate per avere disponibili le armature del condensatore, i campi di temperatura sono diversi e comprendono quello delle **temperature criogeniche** (inferiori a 20 K). L'umidità è una delle grandezze che può determinare variazioni nella composizione di dielettrici costituiti da ceramiche porose. In tal modo si realizzano sensori capacitivi di **umidità**.

5 - Appendici

5.1 - Le trasformate di Laplace e di Fourier

Un sistema lineare a parametri costanti è bene caratterizzato dalla "*funzione di trasferimento*", definita come la trasformata di Laplace dell'uscita del sistema $h(\tau)$ conseguente ad un impulso unitario applicato all'ingresso un tempo τ prima dell'istante considerato:

$$G(p) = \int_0^\infty h(\tau) e^{-p\tau} d\tau$$

La "*risposta in frequenza*" o "*funzione di risposta armonica*" è definita invece come la trasformata di Fourier della suddetta uscita:

$$G(f) = \int_0^\infty h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

In sistemi lineari a parametri costanti le funzioni *G(p)* e *G(f)* possono essere ottenute dal rapporto tra le trasformate di Laplace e di Fourier dell'uscita e dell'ingresso del sistema. La *G(f)* è generalmente una quantità complessa e può essere espressa in termini di un modulo e di una fase o di una componente reale e di una immaginaria come indicato nelle seguenti equazioni con chiaro significato dei simboli:

$$G(f) = |G(f)| e^{-j\phi(f)} \qquad G(f) = G_R(f) + jG_I(f)$$

L'uso delle funzioni *G(p)* e *G(f)* permette di caratterizzare un sistema dinamico mediante i diagrammi a blocchi e di determinare le caratteristiche complessive quando siano note le funzioni di trasferimento o di risposta in frequenza dei singoli blocchi, rappresentativi dei dispositivi costituenti il sistema di misura. In particolare se il sistema è costituito da N blocchi caratterizzati dalle funzioni $G_i(p)$ e $G_i(f)$ e siano assenti o trascurabili effetti di carico e di retroazione, le funzioni di trasferimento e di risposta in frequenza sono date semplicemente dal prodotto delle singole funzioni:

$$G(p) = \prod_{i=1}^{N} G_i(p) \qquad G(f) = \prod_{i=1}^{N} G_i(f)$$

$$|G(f)| = \prod_{i=1}^{N} |G_i(f)| \qquad \phi(f) = \sum_{i=1}^{N} \phi_i(f)$$

Per un sistema di dispositivi in cascata, in cui non vi siano effetti di carico di un blocco sull'altro, né condizioni di retroazione, il modulo della *G(f)* è dato dal prodotto dei moduli delle funzioni dei singoli blocchi, mentre la $\phi(f)$ è data dalla somma delle fasi.

5.2 - Risposta di un sistema del primo ordine a una funzione gradino

Si consideri il sistema in equilibrio prima del tempo *t=0*, istante in cui il misurando assume il valore *A* di regime. La trasformata di *Laplace* della funzione gradino di ampiezza *A* è data da *X(p)=A/p*, per cui nota la *G(p)* di un sistema del primo ordine, riportata nel paragrafo 3.7, si ottiene:

$$Y(p) = G(p)X(p) = \frac{kA}{p(1+p\tau)} = \frac{kA}{p} - \frac{kA}{p+\frac{1}{\tau}}$$

L'ultima uguaglianza è stata ottenuta applicando l'espansione in fratti semplici. Utilizzando le tavole che forniscono le antitrasformate di *Laplace* delle funzioni più comuni e tenendo conto delle ipotizzate condizioni iniziali, si ottiene facilmente la seguente funzione temporale *y(t)* caratterizzante il comportamento dinamico di un sistema del primo ordine a cui sia applicata una funzione a gradino:

$$y(t) = kA\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

In base alla funzione di trasferimento errore dinamico è possibile calcolare sia la

$$Y_E(p) = -\frac{kA\,p\tau}{p(1+p\tau)} = -\frac{kA}{p+\frac{1}{\tau}}$$

sia, antitrasformando la equazione precedente la funzione temporale errore dinamico:

$$y_E(t) = -kA\,e^{-t/\tau}$$

Dalla figura e dalle equazioni precedenti si ricava che, per minimizzare la funzione errore dinamico nei sistemi del primo ordine, occorre rendere molto piccola la costante di tempo τ. Dal confronto tra la *y(t)* e la $y_E(t)$ è interessante notare che la risposta del sistema può porsi nella forma:

$$y(t) = kA + y_E(t) = y_A(t) + y_E(t)$$

dove con $y_A(t)$ si è indicata la risposta attesa del sistema, caratteristica di un sistema ideale di ordine zero. Dall'equazione precedente si evince che la funzione errore dinamico può ricavarsi come differenza tra la risposte del sistema effettiva e attesa.

5.3 - Risposta di un sistema del primo ordine a una funzione impulsiva

La funzione impulsiva può essere considerata la somma di due gradini della stessa ampiezza e di segno contrario che si succedono in un tempo molto piccolo, al limite nullo. Un impulso ideale ha inoltre un'ampiezza che tende ad essere infinitamente elevata. Se si indica con *T* la durata dell'impulso, nell'intervallo di tempo *(0,T)* il sistema si comporta come se ad esso fosse applicato un gradino, per cui in base all'equazione che fornisce la risposta del sistema del primo ordine ad una funzione a gradino, si ha:

$$y(t) = \frac{kA}{T}\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

per t compreso nell''intervallo $(0,T)$, essendo l'ampiezza del gradino pari a A/T. Dopo il tempo $t=T$ la risposta del sistema evolverà come nel caso della soppressione del gradino, pertanto, per $t > T$, si ha:

$$y(t) = Be^{-t/\tau}$$

La costante B si ottiene imponendo la condizione che le due equazioni precedenti siano uguali al tempo T, da cui si ricava: $B=kA(e^{T/\tau}-1)/T$. Per determinare la risposta di un impulso di durata infinitesima si deve imporre la condizione che T tenda a zero:

$$y(t) = \lim_{T\to 0}\frac{kA}{T}\left(e^{T/\tau} - 1\right)e^{-t/\tau} = \frac{kA}{\tau}e^{-t/\tau}\lim_{T\to 0}e^{T/\tau} = \frac{kA}{\tau}e^{-t/\tau}$$

Poiché la risposta ideale del sistema dovrebbe essere nulla immediatamente dopo l'impulso che si verifica al tempo $t=0$, l'equazione precedente coincide con la $y_E(t)$ e conferma che un sistema del primo ordine presenta un errore dinamico tanto più ridotto quanto più è piccola la sua costante di tempo. In base all'equazione precedente, quanto più τ è piccolo tanto più la risposta del sistema risponde perfettamente all'impulso ideale presentando un'ampiezza che tende all'infinito in un tempo infinitesimo. Un tale comportamento è impossibile per un sistema fisico reale in quanto richiederebbe un trasferimento di energia a velocità infinita. In ogni caso le condizioni fornite precedentemente vanno nella direzione di una ottimizzazione della risposta del sistema.

5.4 - Risposta di un sistema del primo ordine a una funzione a rampa

La funzione a rampa è molto più realistica delle due precedenti funzioni canoniche in quanto più facilmente realizzabile in pratica. Si consideri il sistema inizialmente in equilibrio al tempo $t=0$ e una funzione con una pendenza costante R: $x(t) = Rt$. La trasformata di *Laplace* di questa funzione è R/p^2, per cui, in base alla funzione di trasferimento di un sistema del primo ordine, riportata nel paragrafo 3.7, si ha:

$$Y(p) = \frac{kR}{p^2(1+p\tau)} = \frac{kR}{p^2} - \frac{kR\tau}{p} + \frac{kR\tau}{p+\frac{1}{\tau}}$$

In base alle condizioni iniziali e alle tavole delle antitrasformate di *Laplace*, dalla precedente si ottiene:

$$y(t) = kR\left(t - \tau e^{-t/\tau} - \tau\right)$$

tenendo conto che la funzione attesa è $y_A(t)=kRt$, si ricava la funzione errore dinamico:

$$y_E(t) = y(t) - y_A(t) = kR\left(\tau e^{-t/\tau} - \tau\right)$$

Lo stesso risultato si sarebbe ottenuto antitrasformando la funzione $Y_E(p)$ data da: $Y_E(p)=-R\tau/p(1+p\tau)$. La funzione errore dinamico in questo caso consta di due termini: uno transitorio $kR\tau e^{-t/\tau}$; uno stazionario $-kR\tau$. Al solito ambedue questi errori si riducono al tendere a zero di τ.

5.5 - Risposta in frequenza di un sistema del primo ordine

Una delle risposte più importanti di un sistema è quella a un ingresso sinusoidale della forma $x(t)=Asen\omega t$, in quanto tutti i segnali complessi stazionari possono essere ricondotti a somme di risposte di questo tipo. Il segnale in uscita avrà una forma sinusoidale della stessa pulsazione ω del misurando, ma potrà presentare errori di ampiezza e fase. L'approccio alla soluzione del problema può essere di diverso tipo. Per omogeneità di trattazione si seguirà quella dei paragrafi precedenti. La trasformata di Laplace della funzione forzante in ingresso risulta:

$$X(p) = \frac{A\omega}{p^2 + \omega^2}$$

dalla quale è possibile ricavare la $Y(p)$:

$$Y(p) = \frac{k}{(1+p\tau)} \frac{A\omega}{p^2+\omega^2} = \frac{kA}{\tau} \frac{\omega}{\left(p^2+\omega^2\right)\left(p+\frac{1}{\tau}\right)}$$

Applicando il teorema di espansione di *Heaviside* e la trasformazione inversa di *Laplace*, dall'equazione precedente si ottiene:

$$y(t) = \frac{kA\tau\omega}{1+\tau^2\omega^2} e^{-t/\tau} + \frac{kA}{\sqrt{1+\tau^2\omega^2}} sen\left(\omega t + \phi\right)$$

dove $\phi=arctg(-\omega\tau)$. Poiché la funzione attesa risulta $kAsen\omega t$, dalla precedente si ricava la funzione errore dinamico:

$$y_E(t) = -kA\left[sen\omega t - \frac{sen\left(\omega t+\phi\right)}{\sqrt{1+\tau^2\omega^2}} \right] + \frac{kA\tau\omega}{1+\tau^2\omega^2} e^{-t/\tau}$$

Sia la $y(t)$ sia la $y_E(t)$ presentano un termine transitorio che si esaurisce tanto più rapidamente quanto più piccolo è τ. Il modulo e la fase del restante termine del secondo membro dell'equazione precedente coincidono con quelli della risposta in frequenza del sistema:

$$G(f) = \frac{k}{1+j2\pi f\tau} = \frac{k}{\sqrt{1+\tau^2\omega^2}} e^{-jarctg(\omega\tau)}$$

Da quanto risulta in base alle precedenti equazioni, un sistema del primo ordine non altera la frequenza del segnale in ingresso, ma può attenuare l'ampiezza e introdurre uno sfasamento, nel senso dei ritardi, di un massimo di 90°. Tali effetti dipendono dal rapporto tra costante di tempo del sistema e frequenza del segnale in ingresso. In particolare per $\omega\tau << 1$ il sistema ha un comportamento coincidente con quello atteso, in quanto ω tende a zero, la radice di $(1+ \omega^2\tau^2)$ tende a 1 e la funzione errore $y_E(t)$ quindi tende a zero.

5.6 - Risposta di un sistema del secondo ordine a una funzione gradino

Dal confronto tra le due funzioni di trasferimento $G(p)$ scritte nel paragrafo 3.9 si ricavano le seguenti relazioni:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{t_1 t_2}} \qquad \zeta = \frac{t_1 + t_2}{2\sqrt{t_1 t_2}}$$

da cui si ottiene anche:

$$t_1 = \frac{1}{\omega_n}\left(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}\right) \qquad t_2 = \frac{1}{\omega_n}\left(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}\right)$$

Nell'ipotesi di gradino di ampiezza A, applicato a un sistema a riposo, la trasformata del segnale d'uscita, in base all'espressione della $G(p)$ in funzione delle costanti di tempo riportata nel paragrafo 3.9, è data da:

$$Y(p) = G(p)X(p) = \frac{kA}{p(1+pt_1)(1+pt_2)}$$

che ha come antitrasformata:

$$y(t) = kA\left[1 - \frac{1}{t_1 - t_2}\left(t_1 e^{-t/t_1} - t_2 e^{-t/t_2}\right)\right]$$

il sistema si porta a regime dopo un certo tempo che dipende dai valori delle due costanti di tempo. La precedente equazione si può scrivere, in base alle relazioni prima evidenziate tra le costanti di tempo con pulsazione e fattore di smorzamento, anche nella seguente forma:

$$\frac{y(t)}{kA} = 1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\frac{\omega_n t}{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}} + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\frac{\omega_n t}{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}}$$

Nota la funzione di trasferimento errore dinamico per un sistema del secondo ordine, riportata nel paragrafo 3.9, è possibile ricavare la trasformata di *Laplace* della funzione errore dinamico:

$$Y_E(p) = G_E(p)X(p) = -kA\left(t_1 + t_2\right)\frac{1 + p\dfrac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}}{(1 + pt_1)(1 + pt_2)}$$

la cui antitrasformata è data da:

$$y_E(t) = \frac{kA}{t_1 - t_2}\left(-t_1 e^{-t/t_1} + t_2 e^{-t/t_2}\right) = y(t) - kA$$

che poteva facilmente essere ricavata dalla y(t), ricordando che la funzione attesa risulta $y_A(t)=kA$. Al solito la $y_E(t)$ può essere espressa in funzione di ζ e ω_n. Le radici sono complesse per $\zeta<1$ e il sistema è sottosmorzato. Le radici sono reali coincidenti per $\zeta=1$ e lo smorzamento è critico. Le radici sono reali per $\zeta>1$ e si ha un sovrasmorzamento. La sovraelongazione *s*, quantità minore dell'unità, dipende unicamente dal fattore di smorzamento e ha la seguente espressione: $s = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}}$

5.7 - Risposta di un sistema del secondo ordine a una funzione impulsiva

Seguendo una procedura analoga a quella di un sistema del primo ordine, soggetto a una funzione impulsiva, è possibile ricavare la risposta del sistema del secondo ordine quando l'ampiezza dell'impulso di durata finita sia *A*:

$$\frac{y(t)}{kA} = -\frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\frac{\omega_n t}{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}} + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\frac{\omega_n t}{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}}$$

L'equazione precedente contiene tutte le informazioni relative alla funzione errore dinamico.

5.8 - Risposta di un sistema del secondo ordine a una funzione a rampa

Nel caso di una rampa di equazione $x(t) = Rt$, la cui trasformata di *Laplace* è R/p^2, nota la funzione di trasferimento errore dinamico per un sistema del secondo ordine, riportata nel paragrafo 3.9, è possibile ricavare la $Y_E(p)$:

$$Y_E(p) = G_E(p)X(p) = -\frac{kR}{p}\left(t_1 + t_2\right)\frac{1 + p\dfrac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}}{(1 + pt_1)(1 + pt_2)}$$

la cui antitrasformata è:

$$y_E(t) = -kR\left(t_1 + t_2\right) + \left(\frac{t_1^2 e^{-t/t_1}}{t_1 - t_2} - \frac{t_2^2 e^{-t/t_2}}{t_1 - t_2} \right) = y(t) - kRt$$

Aggiungendo alla equazione precedente la funzione attesa $y_A(t)=kRt$ ed esprimendo le costanti di tempo in funzione di ζ e di ω_n, si ottiene la seguente risposta del sistema a una funzione a rampa:

$$\frac{y(t)}{kR} = t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + \frac{1}{2\omega_n\sqrt{\zeta^2-1}} \left[-\left(2\zeta^2 - 1 + 2\zeta\sqrt{\zeta^2-1}\right) e^{\frac{\omega_n t}{\zeta+\sqrt{\zeta^2-1}}} + \left(2\zeta^2 - 1 - 2\zeta\sqrt{\zeta^2-1}\right) e^{\frac{\omega_n t}{\zeta-\sqrt{\zeta^2-1}}} \right]$$

5.9 - Risposta in frequenza di un sistema del secondo ordine

In analogia alla procedura seguita per i sistemi del primo ordine, la trasformata di *Laplace* della risposta del sistema a un segnale sinusoidale in ingresso di ampiezza A e pulsazione ω può essere ricavata dalla $X(p)$ e dalla $G(p)$ e, ricordando la seguente espressione di $X(p)$, per un sistema del secondo ordine, è data da:

$$X(p) = \frac{A\omega}{p^2 + \omega^2} \qquad Y(p) = G(p)X(p) = \frac{A\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{k}{(1 + pt_1)(1 + pt_2)}$$

Antitrasformando la precedente si ottiene la risposta del sistema, che può essere caratterizzato anche mediante le funzioni di risposta armonica di ampiezza e fase date da:

$$\left|G(j\omega)\right| = \frac{k}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\phi = arctg \frac{2\zeta}{\frac{\omega}{\omega_n} - \frac{\omega_n}{\omega}}$$

Bibliografia

[1] Allocca, J.A., Stuart, A., *Transducers - Theory and Applications,* Reston Publishing Company, Inc., A Prentice-Hall Company,1984.
[2] Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M., White, N., *MEMS Mechanical Sensors*, Artech House, Boston, London, 2004.
[3] Brignell, J., White, N., *Intelligent sensor systems*, IOP, Bristol, Philadelphia, 1996.
[4] Egidi, C., *Introduzione alla Metrologia,* Ed. Garzanti, Milano, 1982.
[5] Fraden, J., *Handbook of modern sensors*, AIP Press, New York, 1995.
[6] Gorini, I., *Le misurazioni tramite trasduttori con uscita elettrica*, in: Arri, E., Sartori, S., *Le misure delle grandezze fisiche*, Paravia Editore, Torino 1984.
[7] ISO/GUM, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements*.
[8] Krohn, D., A., *Fiber optic sensors*, ISA, USA, 2000.
[9] Middelhoek, S., Audet, S.A., *Silicon Sensors,* Academic Press, Inc., 1989.
[10] Morris, A.S., *Principles of Measurement and Instrumentation,* Prentice-Hall International (U.K.) Ltd., 1988.
[11] Nachtigal, C.L., *Instrumentation and Control - Fundamentals and their Applications,* John Wiley & Sons, Inc., 1990.
[12] Noltingk, B.E., *Instrumentation Reference Book,* Butterworth & Co. Publishers Ltd., 1988.
[13] Norton, H.N., *Sensor and Analyzer Handbook,* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1982.
[14] Ohba, R., *Intelligent sensor technology,* John Wiley & Sons, Ltd., 1992.
[15] Offelli, C., *Strumentazione Elettronica,* Ed. Libreria Progetto, Padova, 1989.
[16] Oliver, B.M., Cage, J.M., *Electronic Measurements and Instrumentation,* McGraw-Hill, Inc., 1971.
[17] Popovic, R., S., *Hall Effect Devices*, Adam Higler, Bristol, Philadelphia, New York, 1991.
[18] Quarmby, D.J., *Signal Processor Chips,* Granada Publishing Ltd., 1984.
[19] Ristic, L., *Sensor technology and devices*, Artech House, Boston, London, 1994.
[20] Sabins, F., F., *Remote sensing*, Freeman and Company, New York, 2000.
[21] Sheingold, H., *Transducer interfacing handbook*, Analog devices, Norwood, 1980.
[22] Sinclair, I.R., *Sensors and Transducers* - A Guide for Technicians, BSP Professional Books, 1991.
[23] Sydenham, P.H., Hancock, N.H., Thorn, R., *Introduction to Measurement Science and Engineering,* John Wiley & Sons, Ltd., 1989.
[24] Sydenham, P.H., *Handbook of Measurement Science,* Voll. 1, 2 e 3 John Wiley & Sons, Ltd., 1982.
[25] Taylor, R., F., Schultz, J., S., *Chemical and Biological Sensors*, IOP, Bristol, Philadelphia, 1996.
[26] Usher, M.J., *Sensors and Transducers,* MacMillan Publishers Ltd., 1985.
[27] VIM, *International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms*, Third Edition, 2007.
[28] Webster, J., G., *Mechanical Variables Measurement*, CRC, London, New York, 2000.
[29] Zanini, A., *Elementi di Affidabilità,* Soc. Ed. Esculapio, Bologna, 1991.
[30] Zingales, G., *Metodi e Strumenti per le Misure Elettriche*, U.T.E.T., Torino, 1986.

Indice analitico

A
Accelerazione, 18, 19, 66, 75, 76
Accelerometro, 46, 74, 75, 81
Accuratezza, 8-16, 21, 25-28, 54, 72
Adattamento d'impedenza, 30
Adeguatezza, 51, 58
Aerospaziali applicazioni, 56, 57, 65
Affidabilità, 8, 16, 17, 29, 56-63
Aliasing, 14
ADC (*analog to digital converter*), 13, 14, 38
Alimentazione, 17, 29, 30, 43, 48, 74
Alluminio, 77, 81
Ambientale, 54, 63
Amplificatore, 13, 14, 34, 74, 75
Armonica, 41, 45, 85, 91
Arseniuro di gallio, 17, 64, 79
Asimov, 7
Attuatore, 8-12, 14
Autodiagnosi, 12, 59
Autoregolazione, 10, 34
Avaria, 14, 53, 56, 57, 60

B
Banda, 13, 32, 48-50, 64, 68, 75, 79, 82
Banda morta, 31, 48
Barriera di potenziale, 69, 70
Bias strumentale, 26
Biomedico, 8, 16, 19, 56, 57
Biosensore, 8, 10, 11, 19
Bit, 16
Bolometro, 22, 65, 74
Boltzmann, 68, 78
Brand, 54, 57
Bus, 14, 15
Bussola, 78

C
Calcolatore, 3, 8, 10, 14, 24, 53
Calibrazione o Taratura, 31
Campionamento, 12, 14
Campione di misura, 26, 32
Campo di misura, 28, 32-38, 56, 63, 69
Capacità, 21, 70, 74, 84
Caratteristica metrologica, 24-41, 46, 51, 58-63
Caratterizzazione, 24, 45, 65
Catena di misura, 9, 12-14
Cella, 10, 16
Ceramico, 66, 73, 84
Ciclo di vita, 56
Classe di accuratezza o precisione, 27
Classificazione, 19, 20
Comunicazione, 12, 14, 15, 52
Condensatore, 21, 66, 74, 75, 84
Condizioni di regime permanente,
Condizioni di ripetività, 26
Condizioni di riproducibilità, 26
Condizioni operative limiti, 28
Condizioni operative di riferimento, 31
Condizioni operative di targa, 28
Conferma metrologica, 54
Confidenza, 28, 58
Conformità, 51-55
Contatore, 16, 79
Conversione, 10, 11, 17, 38, 69, 74
Convertitori, 13, 22
Controllo, 3, 8-16, 24, 44, 51, 53-62, 65, 79
Coppia, 21, 65
Correzione, 25-28, 30-32, 34, 38, 45, 63, 67
Costante di taratura, 32-36, 40, 41
Crescita epitassiale, 17
Curie, 72, 73
Curva di calibrazione o taratura, 12, 14, 30-36, 45, 63, 77
Curva teorica, 32, 35, 36

D
DAC (*Digital Analog Converter*), 14
De Bridge, 67
Decibel, 13
Deposizione, 17, 18
Deriva strumentale, 33, 34
Deviazione tipo o standard, 26, 28
Diagnostica industriale, 8
Diagnostica medica, 8
Diagramma calibrazione o taratura, 32, 35
Diodo, 37, 38, 69, 70, 83
Dispositivo, 9, 10, 12, 17, 19, 29, 34, 57-61, 79, 83

Dominio, 13, 14, 44
Doppler effetto, 64, 70-72

E

Effetto sistematico, 25, 27, 34, 35
Elettrodinamico effetto, 80
Elettromagnetico effetto, 20, 64
Elettrone, 66-69, 78
Eliminazione, 49, 55
Encoder, 16
Errore aleatorio, 26
Errore di linearità, 36-38
Errore di misura, 26, 60
Errore dinamico, 39, 40, 42, 45, 87
Errore massimo ammissibile, 60
Errore sistematico, 26, 35, 41
Errore transitorio, 44, 48
Ettingshausen effetto, 79
Evaporazione, 17, 68, 79

F

Faraday legge, 79
Fascia di incertezza, 35, 42, 45, 48
Fattori, 57, 58
Fermi livello, 80, 81
Ferro, 65, 70
Fibra ottica, 11, 12, 64
Film, 17, 18, 77
Filtraggio, 14
Filtro, 13, 14, 45, 73
Forza, 10, 11, 18, 19, 21, 65, 73-78, 80
Fourier, 85
Fotone, 67, 69
Fotodiodo, 16, 64, 70
Fotolitografia, 17, 18
Fototransistor, 16, 64, 70
Fowler, 67
Frequenza di campionamento, 14
FSO (*full scale output*), 29, 32, 33
Funzione a rampa, 39, 44, 48-50, 87, 90
Funzione di trasferimento, 29, 39-41, 46, 85-91
Funzione gradino, 39, 42-44, 46-48, 50, 86-90
Funzione impulsiva, 39, 42-44, 48, 50, 85-90
Funzione indicativa, 9
Funzione obiettivo, 35
Funzione sinusoidale, 39, 44-49, 88-91

G

Germanio, 16, 68, 73
GPS (*Global Positioning System*), 18, 77
Grandezza di influenza, 28, 30, 31, 34, 35, 39, 54, 62, 63
Guasto, 55-62

H

Hall effetto, 16, 21, 66, 77-79
Host computer, 14

I

IC (*Integrated Circuit*), 16, 17
ICT (*Information Communication Technologies*), 3
Imprecisione, 26
Inaccuratezza, 26
Inaffidabilità, 57, 62
Incertezza (definizione), 28
Incertezza strumentale, 24, 26, 28, 31, 38, 57, 63
Incisione, 17, 18
Indicazione (definizione), 10
Induttanza, 21, 76, 79, 80
Informazione, 9, 10, 25, 29,52, 77
Infrarosso, 68, 69, 81
Intervallo di lavoro, 28
Intervallo nominale, 28
Invecchiamento, 63
Isteresi, 35, 68, 73, 75

K

Kelvin, 75

L

Laplace, 40, 85-91
LED (*light emitting diode*), 16, 64, 79
Limite di errore, 60
Limite di velocità, 39
Linearità, 32, 36-38, 46, 73, 83
Linearizzazione, 33, 36-38, 77
LOC (*lab on a chip*), 12
Lorentz forza, 78
LSM (*least square method*), 35

M

Magazzino, 54, 59, 63
Magnetoresistivo effetto, 65, 77
Magnetostrizione effetto, 17, 61, 72

Marketing, 51, 53
Manutenzione, 8, 17, 24, 54-58, 61
Marcatura, 51
Marchio, 54, 57
Markoviane tecniche, 59
Massa, 3
Memoria, 38
MEMS (*micro electronic mechanical system*), 11, 16-18, 66, 73, 75, 77, 81
Mercato, 11, 14, 18, 20, 51-54, 57
Metodo dei minimi quadrati, 35, 36
Metodo diretto di misura, 25
Metodo indiretto di misura, 25
Metrologia, 3, 7
Modello matematico, 39
Modificatori, 22
Monitoraggio ambientale, 8, 15, 30

N

Nanotecnologie, 9, 12
Natura della grandezza, 25, 29
Newton-Raphson, 38
Niobato di litio, 74

O

Object-oriented, 15
Offse, 33-35, 63

P

Peltier effetto, 81
Permalloy, 76
Piezoelettrico effetto, 16, 19, 20, 64, 65, 72-75
Piezoresistivo effetto, 65, 72, 75
Pickup, 10
Piroelettrico effetto, 65, 72, 74, 75
Plank, 66
Platino, 82
Pletismografia, 64
Portata, 3, 12, 14, 28, 32, 37, 81
Posizione, 21, 60, 65, 76
Potenza, 10, 13, 17, 20, 29, 66, 79, 82
Precisione, 8, 25-28, 30, 44
Precisione intermedia, 26
Pressione, 9, 18, 19, 21, 63, 64, 66, 73-76
Probabilità, 28, 56, 59, 61
Procedura, 25, 33, 38, 55, 60
Pulsazione, 45, 46, 49, 88, 89, 91

Q

Qualità, 3, 7, 24, 25, 29, 50-59
Quarzo, 10, 16, 20, 72, 74

R

Radar, 11, 64, 71, 72
Radiazione, 17, 18, 22, 64, 67-71, 75, 81
Radiotachimetro, 72
Rapporto segnale rumore, 13
Regolazione, 15, 27, 31, 32, 34
Resistore, 21, 37, 38
Retroazione, 10, 75, 85
Riciclaggio, 55
Ridondanza, 59
Riparazione, 59, 62
Ripetibilità, 26, 27, 35
Riproducibilità, 8, 16, 33, 37, 38, 69
Risposta in frequenza, 45, 48-50, 70, 85, 88, 91
Risultato di misura, 12, 25, 28, 30, 31
Ritardo, 35, 39, 40, 42, 44, 45, 48-50, 67
Rivelatore, 9, 10
Robot, 3, 7, 8, 65
Robotica, 3, 7, 9, 10, 53
Rodaggio, 61
ROM (*read only memory*), 38
Rumore, 13, 14, 30, 40, 64, 79

S

Saturazione, 37
SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), 15
Scala graduata, 8
Schermo, 8
Seebeck 66, 80-82
Seleniuro di cadmio, 68
Seleniuro di piombo, 68, 69
Selettività, 33
Semiconduttore, 9, 19, 64, 68, 77
Sensibilità, 8, 12, 21, 30-35, 38, 41, 44, 63, 68-70, 73-82
Sensore (definizione), 9
Sensore a controllo di guasto, 60
Sensori attivi, 20-23, 66, 69, 74
Sensore esperto, 14
Sensori integrati, 11, 37
Sensori passivi, 20-23, 29, 30, 68, 69, 84
Settling time, 42

Settore, 11, 18, 19, 51, 64
Sicurezza, 12, 15, 55, 57, 60, 63
Siemens, 82
Silicio, 11, 12, 16-18, 64, 70, 73, 75, 81, 83
Sistema sensorio, 10, 14, 58, 62
Smart sensor, 12, 13, 38, 44
Smorzamento, 46-48, 89-90
Solfuro di cadmio, 68
Solfuro di piombo, 68, 69
Soglia di discriminazione, 33
Sonda, 80
Sopraelongazione, 48
Specifiche, 24-29, 34, 51, 52, 56-60
Spettro, 66, 68, 71
Spostamento, 16, 19, 21, 33, 66, 76, 78
Strain gauge, 21, 65, 75
Sputtering, 17, 18
Stabilità, 8, 35
Strumento di misura, 8, 24, 25, 27, 32, 57
Systems on a chip, 16

T

Tabella, 20, 21, 32, 38
Taratura o calibrazione (definizione), 31
Tasso di guasto, 62
Tasso di riparazione, 58
Temperatura, 9, 10, 17, 19, 21, 30, 31, 58, 59, 63, 65-68, 73-84
Tempo cumulativo, 58
Tempo di assestamento, 42, 47, 48
Tempo di recupero, 39
Tempo di risposta al gradino, 42
Tempo di salita, 42, 48
Tempo di vita, 56
Tempo morto, 48, 50
Tempo medio al primo guasto (MTTF), 58, 61
Tempo medio fra guasti (MTBF), 59, 60, 61, 62
Tempo medio alla riparazione (MTTR), 59
Tempo reale, 12
Tensione, 13, 14, 20, 29, 33, 37, 43, 44, 66, 68, 70, 73-77, 81
Termico effetto, 30, 63, 65, 68
Termistore, 21, 83
Termocoppia, 10, 11, 23, 66, 80-82
Termopila, 81, 82
Termoresistivo effetto, 66, 75, 82
Titanato di bario, 73, 74
Titanato zirconato di piombo, 73, 74
Tolleranti all'avaria, 59, 60
Transistor, 83
Trasduttore (definizione), 9
Trasmettitori, 9

U

Ultrasuoni, 64, 72
Ultravioletto, 68

V

Validazione, 24, 51, 53
Valore di fondo scala, 28, 32, 35, 36, 75
Valore vero, 25, 28
Velocità, 10, 16, 18-22, 39, 47, 64, 66, 69, 71, 78-81
Veridicità, 26, 32
Verifica, 14, 24, 33, 35, 36, 42, 53-55, 63
Vibrazione, 19-21, 29, 46, 63, 73
Villary, 65, 76
Voigt, 73
Vita operativa, 29, 56

W

Web sensor, 15
Wiedemann, 65, 76

Z

Zener diodo, 14, 43, 44

Questo quaderno è rivolto a quanti, anche se non in possesso di una cultura specifica, sono affascinati dallo sviluppo scientifico e si vogliono avvicinare alla scoperta del mondo della sensoristica, un campo in forte evoluzione e che attraverso le micro e le nano tecnologie si svilupperà sempre più nel prossimo futuro. La qualità dei prodotti e dei processi è notevolmente migliorata grazie anche all'evoluzione dei sistemi di misura, gestiti in genere da un calcolatore ed in grado sia di elaborare una serie notevole di informazioni provenienti da diversi sensori, sempre più miniaturizzati e distribuiti, sia di eseguire l'autocontrollo delle prestazioni. Le Information and Communication Technologies (ICT) permettono oggi di creare sistemi informativi molto efficienti per svariate applicazioni. Sono stati realizzati diversi sistemi artificiali che utilizzano algoritmi genetici, capaci di apprendimento, e che rappresentano un modello dell'attività cognitiva umana. L'importanza di imparare a misurare, ovvero di saper impiegare al meglio i sensori, deriva dalla semplice constatazione che solo misure corrette sono in grado di convalidare la bontà del sistema informativo e di permetterne l'espansione attraverso l'auto apprendimento. Viceversa, se le misure sono errate, si potrà ritenere non valido anche un sistema informativo ben progettato.
Il quaderno, che è suddiviso in due parti (la seconda delle quali sarà pubblicata in seguito e conterrà la descrizione dei sensori più diffusi in campo industriale), può essere utile a quanti nelle industrie, nei servizi si trovano ad operare con questi minuscoli dispositivi e non sanno come impiegarli nel modo migliore. Allo scopo di rendere agevole la lettura, tutte le trattazioni matematiche sono riportate in appendice.

Autore

Mario Savino
Insegna al Politecnico di Bari. Ha maturato una notevole esperienza a livello nazionale e internazionale nell'ambito della gestione e del coordinamento di organismi di governo della comunità scientifica, il che lo ha portato a ricoprire una serie di cariche istituzionali, tra le quali si annoverano quelle di Chairman del Comitato Tecnico TC-4 "Measurement of Electrical Quantities" della Confederazione Internazionale delle Misure (IMEKO) e di Preside della 1ª Facoltà d'Ingegneria del Politecnico di Bari. La sua attività scientifica è andata progressivamente orientandosi verso le più attuali tematiche dell'ICT ed in particolare verso verifica, collaudo e controllo di qualità dei dispositivi numerici. Ha trasferito questa sua esperienza, negli insegnamenti da lui impartiti presso le università nelle quali ha insegnato. Nonostante gli impegni derivanti dalla numerose cariche ricoperte, ha svolto e continua a svolgere un'intensa attività scientifica, testimoniata da più di cento pubblicazioni apparse sulle più prestigiose riviste nel campo dell'ICT e dalla partecipazione a più di sessanta congressi internazionali all'estero. È autore di diversi libri.

ISBN 978-88-903149-2-6

€ **14,00**